

RESUMEN

Este proyecto, titulado “*Caracterización de colectores para concentración fotovoltaica*”, consiste en una aplicación en *Labview* para obtener las características de los elementos ópticos utilizados en sistemas de concentración fotovoltaica, atendiendo a la distribución espacial del foco de luz concentrado que generan.

Un sistema de concentración fotovoltaica utiliza un sistema óptico para transmitir la radiación luminosa a la célula solar aumentando la densidad de potencia luminosa. Estos sistemas ópticos están formados por espejos o lentes para recoger la radiación incidente en ellos y concentrar el haz de luz en una superficie mucho menor. De esta manera se puede reducir el área de material semiconductor necesario, lo que conlleva una importante reducción del coste del sistema.

Se pueden distinguir diferentes sistemas de concentración dependiendo de la óptica que emplee, la estructura del receptor o el rango de concentración. Sin embargo, ya que el objetivo es analizar la distribución espacial, diferenciaremos dos tipos de concentradores dependiendo de la geometría que presenta el foco de luz. El concentrador lineal o cilíndrico que enfoca sobre una línea, y el concentrador de foco puntual o circular que enfoca la luz sobre un punto. Debido a esta diferencia el análisis en ambos casos se realizará de forma distinta.

El análisis se realiza procesando una imagen del foco tomada en el lugar del receptor, este método se llama LS-CCD (Difusión de luz y captura con CCD). Puede utilizarse en varios montajes dependiendo si se capta la imagen por reflexión o por transmisión en el receptor. En algunos montajes no es posible captar la imagen perpendicular al receptor por lo que la aplicación realizará un ajuste de perspectiva para obtener el foco con su forma original.

La imagen del foco ofrece información detallada acerca de la uniformidad del foco mediante el mapa de superficie, que es una representación en 3D de la imagen pero que resulta poco manejable. Una representación más sencilla y útil es la que ofrecen los llamados “perfiles de intensidad”. El perfil de intensidad o distribución de la irradiancia que representa la distribución de la luz para cada distancia al centro, y el perfil acumulado o irradiancia acumulada que representa la luz contenida en relación también al centro. Las representaciones de estos perfiles en el caso de un concentrador lineal y otro circular son distintas debido a su diferente geometría. Mientras que para un foco lineal se expresa el perfil en función de la semi-anchura del receptor, para uno circular se expresa en función del radio. En cualquiera de los casos ofrecen información sobre la uniformidad y el tamaño del foco de luz necesarios para diseñar el receptor.

El objetivo de este proyecto es la creación de una aplicación software que realice el procesamiento y análisis de las imágenes obtenidas del foco de luz de los sistemas ópticos a caracterizar. La aplicación tiene una interfaz sencilla e intuitiva para que pueda ser empleada por cualquier usuario. Los recursos necesarios para realizar el proyecto son: un PC con sistema operativo Windows, el software *Labview 8.6 Professional Edition* y los módulos *NI Vision Development Module* (para trabajar con imágenes) y *NI Report Generation Toolkit* (para realizar reportes y guardar datos de la aplicación).

ABSTRACT

This project, called “*Characterization of collectors for concentration photovoltaic systems*”, consists in a *Labview* application to obtain the characteristics of the optical elements used in photovoltaic concentrator, taking into account the spatial distribution of concentrated light source generated.

A concentrator photovoltaic system uses an optical system to transmit light radiation to the solar cell by increasing the light power density. This optical system are formed by mirrors or lenses to collect the radiation incident on them and focus the beam of light in a much smaller surface area. In this way you can reduce the area of semiconductor material needed, which implies a significant reduction in system cost.

There are different concentration systems depending on the optics used, receptor structure or concentration range. However, as the aim is to analyze the spatial distribution, distinguish between two types of concentrators depending on the geometry that has the light focus. The linear or cylindrical concentrator that focused on a line, and the circular concentrator that focused light onto a point. Because this difference in both cases the analysis will be carried out differently.

The analysis is performed by processing a focus image taken at the receiver site, this method is called “LS-CCD” (Light Scattering and CCD recording). Can be used in several mountings depending on whether the image is captured by reflection or transmission on the receiver. In some mountings it is not possible to capture the image perpendicular to the receivers so that the application makes an adjustment of perspective to get the focus to its original shape.

The focus image provides detail information about the uniformity of focus through the surface map, which is a 3D image representation but it is unwieldy. A simple and useful representation is provided by so called “intensity profiles”. The intensity profile or irradiance distribution which represents the distribution of light to each distance to the center. The accumulated profile or accumulated irradiance that represents the cumulative light contained in relation also to the center. The representation of these profiles in the case of a linear and a circular concentrator are different due to their distinct geometry. While for a line focus profile is expressed in terms of semi-width of the receiver, for a circular concentrator is expressed in terms of radius. In either case provides information about the uniformity and size of focus needed to design the receiver.

The objective of this project is the creation of a software application to perform processing and analysis of images obtained from light source of optical systems to characterize. The application has a simple and a intuitive interface so it can be used for any users. The resources required for the project are: a PC with Windows operating system, LabVIEW 8.6 Professional Edition and the modules NI Vision Development Module (for working with images) and NI Report Generation Toolkit (for reports and store application data .)

Álvaro Rodrígálvarez Caballero

Caracterización de colectores para sistemas de concentración fotovoltaica

Proyecto fin de carrera

Caracterización de colectores para sistemas de concentración fotovoltaica

Autor : Álvaro Rodrigálvarez Caballero

Tutor : Ignacio Antón Hernández

Fecha de presentación : Septiembre de 2012

Índice de contenido

1. Introducción y objetivos	5
1.1 Descripción del problema.....	5
1.2 Elección de LabView	6
2. Sistemas fotovoltaicos de concentración	8
2.1 Introducción.....	8
2.2 Principio de funcionamiento.....	8
2.3 Tipos de sistemas de concentración fotovoltaica.....	12
2.3.1 Concentrador de foco puntual con una única célula.....	13
2.3.2 Concentrador de foco puntual de gran área.....	14
2.3.3 Concentrador lineal.....	14
2.3.4 Concentrador estático.....	15
2.3.5 Módulo de concentración.....	16
2.4 Foco de luz.....	16
3. Caracterización del foco de luz en óptica energética.....	19
3.1 Método LS – CCD.....	20
3.2 Montajes ópticos.....	21
3.3 Imágenes y transformación.....	26
3.3.1 OBTENCIÓN PERSPECTIVA.....	27
4. Procesado de las imágenes.....	30
4.1 Desarrollo matemático	30
4.1.1 CALIBRACIÓN ESPACIAL.....	30
4.1.2 PROCESADO.....	31
5. Aplicación.....	37
5.1 Diagrama de flujo de la aplicación.....	38
5.1.1 Inicialización variables.....	39
5.1.2 Esperar evento.....	39
5.1.3 Cargar imagen foco.....	39
5.1.4 Calibrar el sistema.....	40
5.1.5 Información de la imagen	40
5.1.6 Procesar imagen.....	40
5.1.7 Perspectiva (Obtener y corregir perspectiva).....	41
5.1.8 Salvar datos.....	41
5.1.9 Salir.....	42
5.2 Descripción funcional de la aplicación	42
5.2.1 Identificación del panel principal.....	42
5.2.2 Cargar y visualizar imagen del concentrador.....	43
5.2.3 Elegir parámetros y mostrar información de la imagen.....	44
5.2.4 Calibración espacial del sistema.....	46
5.2.5 Obtención y corrección de la perspectiva.....	48
5.2.6 Salvar datos imagen.....	51
5.2.7 Procesado de la imagen del foco.....	52
5.2.8 Salir de la aplicación	55
6. Ejemplos de montajes prácticos.....	56
6.1 Concentrador EUCLIDES.....	56
6.1.1 Introducción.....	56
6.1.2 Descripción del sistema.....	57
6.1.3 Tecnología de los espejos.....	58

6.1.4 Receptor.....	59
6.1.5 Estructura del seguidor.....	61
6.1.6 Análisis casos prácticos.....	62
6.2 Montaje con lente esférica	66
6.2.1 Montaje en banco óptico.....	66
6.2.2 Análisis caso práctico.....	68
6.3 Montaje con transmisión mediante fibra.....	70
6.3.1 Introducción.....	70
6.3.2 Descripción del sistema.....	71
6.3.3 Sistema óptico	71
6.3.4 Receptor óptico y haz de fibras	73
6.3.5 Módulo receptor de células.....	73
6.3.6 Sistema de seguimiento.....	75
6.3.7 Análisis casos prácticos.....	76
Bibliografía.....	79
Anexo A. Descripción código de aplicación.	80
A.1 Cargar imagen foco.....	81
A.2 Calibrar el sistema	84
A.3 Información de la imagen.....	87
A.4 Obtener y corregir perspectiva.....	93
A.5 Procesar imagen foco.....	96
A.5.1 PERFILES 2D.....	98
A.5.2 PERFILES 3D.....	105
A.6 Guardar datos de la imagen.....	106
A.7 Salir de la aplicación	109

1. Introducción y objetivos

1.1 Descripción del problema

Actualmente los niveles de consumo energético de la humanidad han llegado a unos límites que no solo están agotando los recursos sino que están degradando su entorno debido a los efectos secundarios que su transformación en energía útil conlleva. Afortunadamente disponemos de la tecnología necesaria para responder a ello adaptando nuevos sistemas energéticos basados en recursos limpios e inagotables, es lo que se conoce como energías renovables. Entre tales energías, la energía solar fotovoltaica constituye una de las más importantes por la abundancia del recurso y la sencillez de su transformación en energía eléctrica útil. Sin embargo el coste de esta energía sigue siendo mayor que en las convencionales y una forma de reducir costes, mediante el abaratamiento de los sistemas, es la concentración fotovoltaica (CPV).

Un sistema de concentración fotovoltaica se caracteriza por el uso de un sistema óptico que transmite la radiación luminosa a la célula solar, aumentando la densidad de potencia luminosa. Estos sistemas utilizan una lente u otro elemento óptico como espejos para recoger la radiación incidente en ellos y concentrar el haz de luz en una superficie mucho menor pero que recoge la misma energía que incide en la entrada del sistema. De esta manera se puede reducir el área del material semiconductor necesario para recoger dicha energía, reduciendo así el coste del sistema. Esto ha despertado el interés de fabricantes de células que desarrollan y mejoran células para su uso en concentración. Es el caso de las células de alta eficiencia que utilizan más eficientemente el espectro solar y que trabajando en concentración pueden lograr eficiencias superiores al 40%.

Existe abundante normativa para la medida, caracterización y cualificación de módulos fotovoltaicos convencionales; sin embargo no existe apenas normativa para módulos y células de concentración. Cuando se diseña un sistema de concentración es habitual diseñar de forma conjunta el receptor y el colector, ya que no existe una amplia disponibilidad de colectores y receptores por separado.

El hecho de no disponer de una especificación estandarizada de los colectores para aplicaciones de concentración fotovoltaica dificulta la labor de un diseño. En este proyecto abordaremos el estudio de las características ópticas de los colectores, proporcionando la información suficiente que permita conocer su comportamiento en las aplicaciones que pueda ser utilizado. Las características que nos interesan son la concentración efectiva que alcanzan los colectores y la distribución espacial del haz de luz concentrada.

1.2 Elección de LabView

LabView es una herramienta software desarrollada por National Instruments para la creación de aplicaciones de adquisición de datos y control. Es una herramienta de programación gráfica basada en la utilización de código fuente gráfico. La herramienta contiene todas las utilidades necesarias para crear, depurar y generar programas ejecutables de aplicación al mundo de la automatización industrial y del test y medida. La primera versión de este software apareció a mediados de los años 80 y estaba preparada para trabajar en entornos de Macintosh. Los programas desarrollados en LabView tienen una estructura basada en la utilización de los siguientes elementos:

- **Interfaz de usuario:** Los objetos del Interfaz de Usuario permite elaborar paneles interactivos de una forma rápida. Los diferentes elementos disponibles en la interfaz de usuario proporcionan mecanismos para leer y visualizar datos mediante menús, paneles, controles y cajas de dialogo.
- **Diagrama de bloques:** Es el código de aplicación en LabView y está formado por estructuras de control (while, case, etc), terminales que identifican a los elementos gráficos de entrada/salida, y por nodos y funciones que realizan operaciones con los datos o controles de entrada para representarlos sobre los indicadores.
- **Adquisición de datos:** En esta parte del programa se realiza el control de los diferentes elementos de adquisición de datos. Estos podrán ser tanto Sistemas de bus externo, como instrumentos programables mediante las interfaces RS232/485, IEEE488 (GPIB), IEEE1155 (VXI), PXI (CompactPCI extension for Instrumentation), bien de bus interno, como tarjetas de adquisición conectadas en los buses de expansión (PCI) y otros elementos como autómatas, sistemas de control de movimiento, adquisición de imágenes, etc.

LabView facilita la utilización de este tipo de sistemas mediante un conjunto de librerías específicas.

- **Análisis de datos:** En esta parte del programa se realiza el tratamiento de la información. LabView incluye librerías matemáticas con funciones de procesado digital de la señal, procesamiento estadístico y procesamiento algebraico. Entre las funciones de procesado digital cabe destacar la existencia de filtros con respuesta al impulso de duración infinita (IIR) y finita (FIR) y de funciones para realizar la transformada rápida de Fourier (FFT) [1].

Por lo tanto, los pasos que se han seguido para realizar la aplicación en LabView son los siguientes:

1. Generación de la interfaz de usuario.
2. Edición del programa fuente completo con ayuda de las diferentes librerías incluidas en el entorno. Para el diseño del programa se debe tener en cuenta todos los aspectos de modularidad, estructuración, etc.
3. Ejecución y depuración utilizando puntos de ruptura y visualización de variables.
4. Creación de un programa ejecutable para que sea independiente de la herramienta.

1.3 Objetivos

- Conocer cuales son los parámetros necesarios para el diseño de un sistema de concentración.
- Diferenciar los tipos de concentradores y las características de cada uno de ellos.
- Determinar la información óptica de un colector de concentración solar que se puede obtener a partir del estudio de su foco de luz.
- Crear una aplicación “software” que realice el procesado y análisis de imágenes del foco de luz de sistemas ópticos obtenidas con una cámara CCD

2. Sistemas fotovoltaicos de concentración

2.1 Introducción

El mercado fotovoltaico ha crecido de forma vertiginosa en los últimos años y presenta halagüeñas perspectivas de futuro, gracias en gran medida a las ayudas que los gobiernos de muchos países han puesto en marcha. Estas ayudas derivadas de los compromisos medioambientales adquiridos se hacen efectivas mediante tarifas o primas, para la generación eléctrica fotovoltaica. La concentración fotovoltaica también se ha visto beneficiada y muchos han puesto sus ojos en ella con la perspectiva de reducir el precio del kW·h producido con las aplicaciones convencionales [SW00]. Esta incipiente atención que recibe la concentración se debe a su potencial de reducir los costes gracias al ahorro de material semiconductor en el sistema y al incremento de la eficiencia.

En los últimos años han aparecido un buen número de prototipos de sistemas de concentración e incluso algunos productos en el mercado. Este interés se ha despertado no sólo en centros de investigación, sino que varias empresas del sector se han acercado a la concentración. Sin salir de nuestras fronteras, los dos grandes fabricantes de células y módulos fotovoltaicos afincados en nuestro país están participando activamente en proyectos de concentración en colaboración con el Instituto de Energía Solar (IES).

2.2 Principio de funcionamiento

Un sistema de concentración es un sistema que utiliza una lente u otro elemento óptico para concentrar el haz de luz sobre la superficie receptora, y así lograr una reducción del área de material semiconductor necesaria. Los tipos de concentradores se pueden clasificar de acuerdo a diferentes tópicos. Una clasificación se refiere a si el concentrador es reflector o refractor. El primero utiliza una superficie reflectante para concentrar la radiación solar, mientras que el segundo lo hace mediante superficies que refractan la luz solar. El efecto de los dos es parecido, recoger la radiación solar de una superficie mayor como es la lente y hacer que incida en una superficie menor que será el receptor. A la relación entre el área neta de entrada de radiación al colector y el área donde se concentra la radiación se le denomina concentración geométrica (X).

La fuente de luz que se utiliza en concentración fotovoltaica es el Sol, por lo tanto los diseños de estos sistemas deben hacerse atendiendo a las propiedades de éste. Su

tamaño angular, visto desde la tierra, es algo más de medio grado ($\pm 0,275^\circ$). El tamaño angular por lo tanto será una relación entre el tamaño real del objeto y la distancia de éste al observador. Podemos ver a continuación una imagen donde podemos ver el concepto de forma gráfica y su expresión matemática.

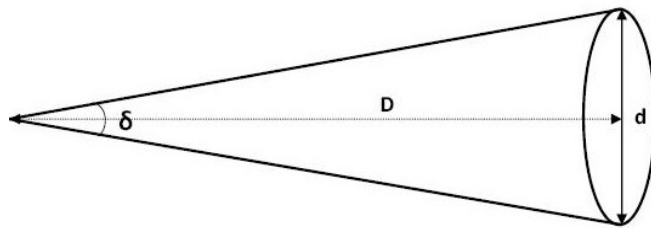


Figura 2.1 Relación entre un objeto y su tamaño angular

$$\delta = \pm \arctan\left(\frac{1}{2} * d / D\right)$$

Los principios básicos de óptica que son necesarios para comprender la concentración fotovoltaica son la *reflexión* y la *refracción*. La reflexión es el cambio de dirección de un rayo de luz que ocurre en la separación entre dos medios, de tal forma que regresa al medio inicial. La *reflexión especular* tiene lugar cuando la superficie es muy lisa y en ella el ángulo formado por el rayo incidente y la recta normal al plano es igual al ángulo que existe entre el rayo reflejado y la normal. La *refracción* es el cambio de dirección que experimenta un rayo de luz al pasar de un medio material a otro, se produce si incide de forma oblicuamente sobre la superficie de separación de ambos medios y si estos tienen índices de refracción distintos. Los senos de los ángulos de incidencia y de refracción son inversamente proporcionales a los índices de refracción. A continuación se puede ver una imagen donde se ve un caso de reflexión y otro de refracción con las relaciones entre sus ángulos debajo.

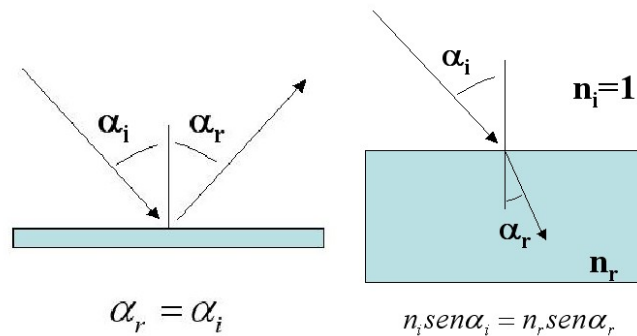


Figura 2.2 - A la izquierda caso de reflexión y a la derecha refracción con las relaciones entre sus ángulos debajo

Las principales características de un sistema de concentración se pueden definir con dos parámetros geométricos: el factor de concentración y la aceptación angular. El factor de concentración es el cociente entre el área de captación de la luz y el área de focalización que produce el dispositivo. El ángulo de aceptación es el máximo ángulo respecto al eje del sistema que puede formar un rayo incidente para que incida sobre el receptor.

La concentración óptica y la aceptación angular están íntimamente relacionadas por el principio de *conservación de Etendue* [1]. De este modo para una aceptación angular dada no se puede sobrepasar el límite de concentración máxima, no pudiendo sobrepasar su producto un valor determinado. Así, concentradores que logran interceptar amplias regiones del cielo (de gran aceptación o estáticos) alcanzan niveles de concentración más bajos, mientras que los niveles de concentración medios y altos (como los que aquí buscamos) sólo son alcanzables mediante sistemas de concentración con seguimiento, que han de apuntarse al Sol debido a su baja aceptación angular. La imagen siguiente muestra un sistema de concentración en el que podemos ver el ángulo con el que los rayos inciden en la entrada del sistema. El ángulo de aceptación del sistema debe ser mayor que éste para que recoja toda la energía.

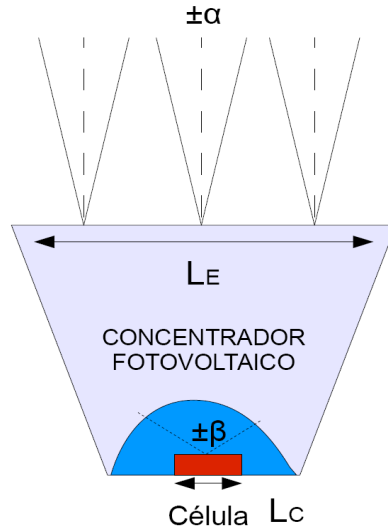


Figura 2.3 – Esquema de sistema de concentración

El teorema de Etendue es una relación de conservación entre la aceptación y la concentración geométrica en un sistema. Su expresión es diferente dependiendo de si es un sistema lineal o uno con simetría de rotación. A partir de la conservación de Etendue podemos hallar la concentración teórica máxima que se puede alcanzar con cada uno de los concentradores, ésta se alcanza si se ilumina la célula desde todas las direcciones posibles ($\beta=90^\circ$). A continuación se escribe el principio de conservación de Etendue para el caso de un sistema lineal (2D) y para el caso de un sistema con simetría rotacional (3D).

$$2D \quad n_i * L_E * \sin(\alpha) = n_c * L_C * \sin(\beta)$$

$$3D \quad n_i^2 * L_E * \sin^2(\alpha) = n_c^2 * L_C * \sin^2(\beta)$$

De estas expresiones se obtiene la concentración máxima ideal para cada tipo de concentrador con el Sol como fuente, si bien estos valores son inalcanzables.

$$\text{Sistema lineal} \rightarrow C_{\text{max-idea}} = \frac{n_c}{\sin(\alpha)} \rightarrow C_{\text{max-idea}} = 214$$

$$\text{Simetría rotacional} \rightarrow C_{\text{max-idea}} = \frac{n_c^2}{\sin^2(\alpha)} \rightarrow C_{\text{max-idea}} = 45831$$

Dependiendo del sistema en el que esté montado el colector podemos distinguir dos categorías básicas: estáticos o con seguimiento. Los concentradores con seguimiento constan fundamentalmente de tres partes: el concentrador o sistema óptico, el receptor donde se encuentra el absorbedor y un mecanismo de seguimiento para el sol. Éstos necesitan forzosamente un mecanismo para seguir el sol y con ellos se pueden lograr altas concentraciones en el receptor. Los estáticos no necesitan del mecanismo para seguir al sol, pero sólo se pueden obtener concentraciones bajas.

Para conseguir la concentración por medio de la reflexión se utilizan espejos de una o varias etapas ópticas en diferentes montajes, y para obtenerla por medio de la refracción se utilizan lentes. La lente más popular en concentración es la lente Fresnel, de gran apertura y distancia focal sin el peso y volumen de material que debería usar en un lente de diseño convencional. Cuando las lentes son grandes, su grosor puede hacerse excesivo, pues hacen la lente muy pesada y cara. Por ello, se puede mantener los radios de curvatura de las lentes separándolas en anillos circulares. El grosor de la lente en cada anillo es diferente, eliminando el enorme espesor que tendría la lente de ser sus superficies continuas, mientras que la superficie presenta un aspecto escalonado.

2.3 Tipos de sistemas de concentración fotovoltaica

De un análisis de los diferentes sistemas de concentración fotovoltaica propuestos que han sido llevados a la práctica, podemos extraer una clasificación atendiendo a sus propiedades geométricas, ópticas, eléctricas y mecánicas. La clasificación es la siguiente y consta de cuatro tipos diferentes:

- Concentrador de foco puntual de gran área.
- Concentrador de foco puntual con una única célula por colector.
- Concentrador lineal.
- Concentrador estático.
- Módulo compacto.

Estos sistemas tienen diferentes características y algunas de ellas son comunes entre varios de los montajes, pero tienen aspectos diferentes por lo que hacemos la distinción.

En cuanto a la geometría de la zona de concentración, que se refiere a la forma que tomará el haz de luz concentrado, y que será la característica que utilizaremos para desarrollar este proyecto podemos distinguir de **foco puntual**, **foco lineal**, y **concentradores estáticos**. Las características de cada uno de los sistemas son las siguientes:

2.3.1 Concentrador de foco puntual con una única célula por colector.

Las características más significativas de este tipo de sistemas de concentración son:

- Óptica basada en lentes Fresnel, con la opción de un secundario para aumentar la aceptación, la concentración o mejorar la uniformidad.
- Rangos de concentración muy variables, de 50x a 300x para células de silicio y de hasta 500x para dispositivos III-V.
- Refrigeración pasiva en la mayoría de los casos debido a que la compacidad de estos dispositivos no es muy alta.
- Sistema de seguimiento en dos ejes, con precisiones de $\pm 0.2^\circ$ para aceptancias de 1° .

Se diferencian del tipo siguiente en que existe un sistema óptico diferenciado para cada dispositivo de conversión fotovoltaica, de tal forma que cada célula recibe la luz proveniente solo de una lente, de ahí que la compacidad del receptor sea baja y la energía a disipar también.



Figura 2.4 – Concentrador de foco puntual basado en lentes Fresnel y células de silicio.

2.3.2 Concentrador de foco puntual de gran área (parquet de células).

A diferencia del caso anterior, existe una única óptica que ilumina a un único receptor formado por muchos dispositivos. La compacidad del receptor es muy elevada y existe una gran densidad de potencia que es necesario extraer. En esta categoría se incluyen los discos parabólicos y las plantas de torre central, aunque este montaje no es muy habitual en el caso de conversión fotovoltaica. Otras características son:

- Óptica basada en espejos.
- Rangos de concentración entre 150x y 500x para discos, y hasta de 2000x en torres centrales. Óptica secundaria opcional en el caso de discos.
- Refrigeración activa debido a la gran compacidad del receptor. Sistema de seguimiento en dos ejes.



Figura 2.5 – Concentrador de foco puntual basado talado en Northern Victoria (Australia)

2.3.3 Concentrador lineal.

La característica principal es el foco de luz en forma de línea. Otras características distintivas son:

- Óptica basada en espejos o en lentes de Fresnel lineales.
- Óptica secundaria opcional para mejorar la uniformidad, aumentar la ganancia o aceptación.
- Rango de concentración entre 10x y 60x, con una óptica secundaria se podrían conseguir concentraciones de 200x.
- Tanto la refrigeración pasiva como la activa son posibles.

- Habitualmente el seguimiento es en un eje para abaratar costes, aunque se reduce la colección de energía ligeramente.



Figura 2.6 – Concentrador lineal Euclides instalado en Tenerife

2.3.4 Concentrador estático

Los concentradores estáticos aprovechan tanto la radiación directa como parte de la difusa que proviene de la bóveda celeste. No necesitan sistema de seguimiento, aunque opcionalmente pueden requerir un ajuste en función de la época del año. Otras características son:

- Células de silicio monofaciales o bifaciales.
- Ganancia de concentración entre 1.5x y 10x. Concentraciones mayores requieren muchos ajustes de posicionamiento para considerarse estáticos.
- Refrigeración pasiva.



Figura 2.7 – Concentrador estático con células bifaciales instalado en el IES

2.3.5 Módulo de concentración

En la actualidad podemos distinguir nuevas familias de dispositivos fotovoltaicos de alta eficiencia, pero que debido a su coste necesitan elevadas concentraciones para ser competitivos, en el rango de 1000X. El tamaño de estos es muy pequeño, entre 1 mm² y 5 mm², y está delimitado por razones térmicas. Debido a esto y aun siendo la ganancia tan elevada, el tamaño de la óptica de concentración es pequeño.

Estos módulos tienen un aspecto y cerrado e incluyen las propias células, las lentes, los secundarios, los diodos de paso, el disipador y las interconexiones. Una buena solución es montar las células que forman el módulo sobre una chapa o similar, que hace tanto de disipador como de aislamiento, y proporciona zonas de interconexión entre dispositivos.

Este tipo de sistemas comparte muchas características con los concentradores de foco puntual con una única célula por colector, pero debido a su compacidad en algunos casos el dispositivo está completamente embebido en la óptica de concentración. El conjunto se alinea y monta en fábrica y forma unidades o módulos inseparables.



Figura 2.8 – Dispositivo de concentración compacto de alta ganancia

2.4 Foco de luz

Podemos hacer otra distinción entre concentradores atendiendo a la geometría del foco de luz concentrado. Esta clasificación no depende de la óptica utilizada, ni de la célula y tampoco del rango de concentración que se puede alcanzar. Los dos tipos que

podemos distinguir son lineal y de foco puntual y dependiendo de esto los montajes de concentración y la distribución de células en el receptor serán diferentes.

La forma que toma el foco en un concentrador lineal es un haz de luz longitudinal al receptor. Este foco de luz se consigue por medio de espejos parabólicos o lentes Fresnel lineales colocados en hileras y con un seguimiento del sol de al menos un eje. Un ejemplo de una imagen de un foco de luz en un concentrador lineal se puede ver en la figura siguiente.

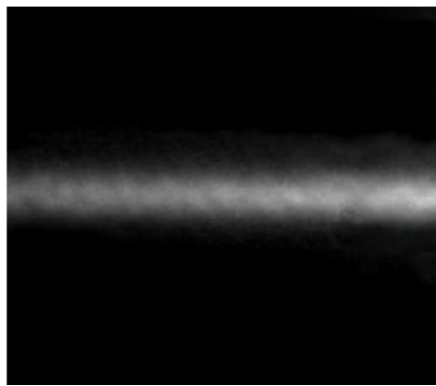


Figura 2.9 – Foco de luz generado por un concentrador lineal

El receptor se coloca también a lo largo de la óptica pero como no existen células de ese tamaño es necesario disponer de varias células conectadas. Se puede ver en la imagen la falta de uniformidad en el foco de luz debido a la distinta irradiancia del concentrador sobre el receptor. Así conociendo las medidas del receptor y la disposición de las células, se puede comparar la irradiancia total que recibiría cada célula. Si éstas estuvieran conectadas en serie, la corriente vendría limitada por la célula de menor fotocorriente. De esta manera podríamos optimizar el concentrador y detectar problemas en el montaje de las células sobre el receptor. En la figura siguiente podemos distinguir la imagen del foco de luz y superpuesta a ella otra imagen con la disposición de las células, de esta forma podemos procesar secciones del foco que coincidan con cada célula y saber que irradiancia llega a cada una de ellas.

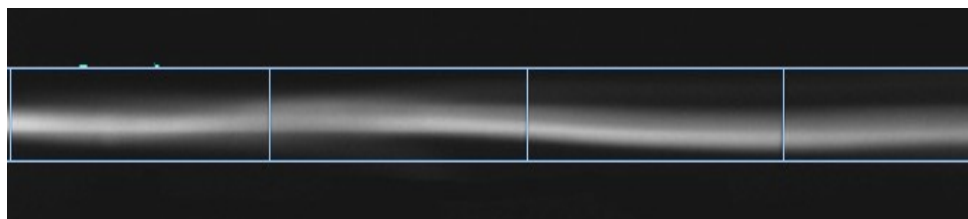


Figura 2.10 – Foco de luz con la posición de las células en el receptor superpuesta

Cuando el foco de luz pertenece a un concentrador con simetría de rotación el receptor consta de una sola célula. En la imagen siguiente se ve el foco de luz y superpuesta el área que ocupa la célula, de esta manera se puede ver si el foco está centrado y si recoge toda la energía.

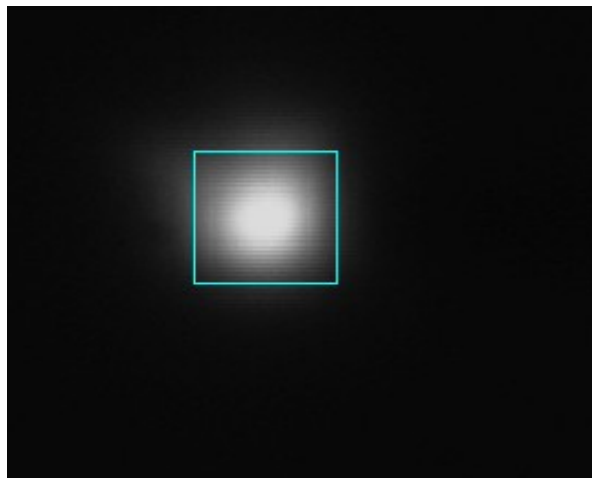


Figura 2.11 – Foco de un concentrador con simetría de rotación con la posición de la célula superpuesta

3. Caracterización del foco de luz en óptica energética

Cuando se diseña un sistema de concentración fotovoltaica es necesario abordar conjuntamente el diseño del receptor y el colector el receptor y el colector para una aplicación determinada, debido a que no existe una amplia disponibilidad de colectores y receptores por separado.

En este PFC se pretende realizar una herramienta que permita caracterizar los sistemas ópticos que se utilizan en concentración fotovoltaica (CPV). La ausencia de normativa ha provocado que cada diseñador utilice sus propios procedimientos para caracterizar el sistema óptico, aunque existen ciertas prácticas habituales adoptadas en busca de un método de caracterización de sistemas ópticos de concentración o que provienen de otro tipo de aplicación óptica.

El hecho de no existir una especificación estandarizada de los colectores dificulta la labor de diseño, ya que algunos parámetros no son proporcionados por el fabricante o no están adaptadas a este tipo de diseño, y es el propio diseñador el que se ve obligado a evaluar la calidad óptica del colector.

Nuestro objetivo es lograr la especificación general de un colector, proporcionando la información suficiente que permita conocer su comportamiento en un amplio abanico de aplicaciones. De esta forma el diseñador podrá contar con información para determinar los parámetros de diseño óptimos. Por ejemplo, la colección de energía de un colector depende del tamaño del receptor, y por tanto, de la concentración geométrica del sistema, que puede optimizarse en función del sistema y del análisis económico del concentrador. Para lograr esta caracterización vamos a realizar un estudio para medir la intensidad y distribución de la luz con independencia del receptor fotovoltaico utilizado, por medio del análisis del foco de luz directamente. Para ello lo que haremos será captar una imagen del foco, corregirla y procesarla para lograr su caracterización, y con ésta determinar la calidad del colector que ha generado el foco de luz.

El foco de luz resultado de haber concentrado la radiación solar sobre un receptor es diferente para cada tipo de concentrador. De este foco nos interesa la distribución de la luz y su intensidad sobre el receptor para caracterizar el concentrador que estamos utilizando. Para analizar la distribución de la luz y su intensidad debemos captar la imagen del foco para posteriormente procesar la imagen. Aquí vamos a explicar un método que para ello utiliza una cámara CCD para captar la imagen y distintos montajes para lograrlo. Este método es el *LS-CCD* [2], (Light Scattering and CCD recording) que significa “Difusión de luz y captura con CCD”.

3.1 Método LS – CCD

Es un método para el estudio de la distribución de la luz, del foco de un concentrador en un receptor fotovoltaico por medio del análisis de la imagen del foco luz concentrado sobre el receptor, captado mediante una cámara CCD. Se puede captar la imagen del foco de dos formas, por reflexión y por transmisión de la luz en el receptor. Una vez obtenida la imagen analizamos la distribución de luz y la geometría del foco para caracterizar el concentrador, conocer el factor de concentración, el enfoque óptimo y la eficiencia óptica del colector. Resulta, por tanto, de gran utilidad una herramienta para analizar la distribución de la luz resultante de un colector, que servirá además para comparar procesos de fabricación y determinar la eficiencia del sistema en función del nivel de concentración.

Existen diferentes montajes para captar la imagen del foco dependiendo de si vamos a captar la luz transmitida o la reflejada en el receptor. El receptor no va a ser un receptor fotovoltaico sino que utilizaremos una superficie reflectora blanco mate o un difusor de cuarzo dependiendo del montaje utilizado.

Este método se puede utilizar para un montaje en exterior con sol real o en un montaje de laboratorio. La instrumentación necesaria consiste en una cámara CCD con su sistema de adquisición de datos, un juego de filtros neutros y el receptor utilizado. En el caso de un montaje en el laboratorio debemos contar también con una fuente de luz colimada que es una luz cuyos rayos son paralelos entre si. Esta luz se asemeja a la luz del sol y por lo tanto el ángulo de aceptación del sistema no tiene que ser alto. Debido a los altos valores de irradiancia obtenidos en muchos casos, el juego de filtros resulta imprescindible para no saturar la imagen obtenida. En un montaje con sol real es necesario situar el colector y el receptor en un seguidor de dos ejes, con la cámara moviéndose solidariamente con ellos.

En el caso de que la superficie receptora necesaria sea reflectora, utilizaremos una superficie plana lambertiana (la distribución angular sigue la función de $\cos \theta$, donde θ es el ángulo que forma respecto a la normal). De esta forma se recoge por igual la radiación proveniente de todo el espejo. En la medida en la que el receptor se comporte como reflector y no como superficie lambertiana, la intensidad luminosa detectada por la cámara corresponderá en mayor medida a una zona del espejo y no a su totalidad, falseando la medida. Un excelente receptor lambertiano se consigue con una superficie plana microgranulada y pintada de blanco mate.

La cámara CCD debe situarse, para mayor simplicidad, perpendicular al receptor. Esto no es posible en todos los casos pero en la medida de que el receptor sea lambertiano y realicemos una medida relativa de la distribución de la luz, el ángulo con que la cámara ve el receptor no influye en la misma. En estos casos será necesario un tratamiento de las imágenes para corregir ese ángulo.

También puede ocurrir que no podamos ubicar la cámara para captar la imagen, por la compacidad del sistema, y tengamos que recurrir a ángulos muy rasantes. En estos casos podemos optar por utilizar un difusor de cuarzo como receptor para poder captar la imagen desde detrás y lograr que esté perpendicular al plano del éste. Una lámina de cuarzo resulta muy apropiada y es capaz de soportar las elevadas temperaturas que origina la luz concentrada, aunque puede ser necesaria ventilación forzada. Otra solución es realizar un pequeño agujero en el colector, muy útil para el caso de espejos de foco puntual.

3.2 Montajes ópticos

Existen multitud montajes de concentración dependiendo del tipo de colector y de la óptica utilizada. Los montajes ópticos hacen referencia al método para lograr la captura del haz de luz con la cámara CCD, sustituyendo el receptor original, que sería la célula, por otro que nos permita capturar la irradiancia o intensidad lumínica incidente en él.

La luz es la clase de energía radiante que puede ser percibida por el ojo humano. En un sentido más amplio, el término luz incluye el rango entero de radiación conocido como espectro electromagnético. Dependiendo de si estudia un aspecto u otro de la luz se distinguen dos ciencias, la fotometría y la radiometría. La fotometría estudia la capacidad que tiene la radiación electromagnética de estimular el ojo humano, y la radiometría se encarga de la medida de la luz en términos de potencia absoluta .

Para comprender mejor el funcionamiento de los montajes, vamos a explicar unos conceptos y magnitudes relativos a la luz. Revisaremos las magnitudes fotométricas *flujo luminoso*, *intensidad luminosa*, *luminancia* e *iluminancia* y sus correspondientes equivalentes radiométricas *flujo radiante*, *intensidad radiante*, *radiancia* e *irradiancia*. Las magnitudes radiométricas se refieren a la medida física de la energía, mientras que las magnitudes fotométricas incluyen la respuesta del ojo humano. Las células fotovoltaicas son capaces de aprovechar no solo el espectro visible sino parte del ultravioleta e infrarojo, y su respuesta espectral difiere de la del ojo humano por lo que usaremos magnitudes radiométricas para caracterizar los sistemas ópticos.

El flujo luminoso es la potencia emitida por algún cuerpo en forma de radiación luminosa visible, de acuerdo a la percepción del ojo humano. Sería equivalente por ejemplo a la potencia en forma de luz visible que una bombilla emite en todas sus direcciones, su símbolo es Φ_v y su unidad es el lumen (lm). Su equivalente en unidades radiométricas es el *flujo radiante* que es la cantidad de energía total emitida por el cuerpo y se mide en Vatios (W).

La *intensidad luminosa* surge de la necesidad de definir como se distribuye el flujo luminoso en cada dirección del espacio. En concreto es el flujo luminoso emitido por unidad de ángulo sólido en una dirección concreta. El ángulo sólido es la zona de espacio limitado por una superficie cónica, visto desde un punto de vista dado, que mide

el tamaño aparente de ese objeto y se mide en estereorradianes (sr). En radiometría se define la intensidad radiante como flujo radiante por unidad de ángulo sólido. El símbolo de la intensidad radiante es I y su unidad es Vatios por estereorradián (W/sr). Podemos ver la expresión que la define a continuación.

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

donde $d\Phi$ es el flujo radiante emitido por la fuente puntual dentro del ángulo sólido $d\Omega$

La luminancia es la relación entre la intensidad luminosa y la superficie aparente vista desde una dirección determinada. Su símbolo es L y su unidad es candela por metro cuadrado (cd/m²). La *radiancia* es su equivalente y se define como la intensidad que sale de una superficie emisora en una dirección dada, por unidad de área en esa dirección. Se mide en Vatios por estereorradián por metro cuadrado (W/sr/m²) y su expresión es la siguiente:

$$L = \frac{d\Phi}{d\Omega S}$$

La superficie aparente vista desde una dirección determinada es la proyección ortogonal de la superficie real sobre un plano perpendicular a la dirección del observador, podemos ver la expresión que la define a continuación.

$$S' = S \cos(\theta)$$

Por lo tanto, atendiendo a las ecuaciones anteriores podemos volver a expresar la radiancia en función de la intensidad radiante y del ángulo que forma el observador con la superficie emisora o reflectora.

$$L = \frac{I_{\theta}}{S \cos(\theta)}$$

La última magnitud fotométrica es la *iluminancia* que se define como el flujo luminoso que recibe una superficie, y su unidad es el lux (lx) que es un lm/m². Su equivalente es la *irradiancia* y se utiliza para describir la potencia incidente por unidad de superficie, su símbolo es E y se mide en Vatios por metro cuadrado (W/m²). Su expresión es la siguiente:

$$E = \frac{d\Phi}{dS}$$

Diferenciaremos dos tipos de montaje en función de si captamos la irradiancia por medio de reflexión o por transmisión en el receptor. Si captamos la reflexión utilizaremos un reflector lambertiano y si captamos la irradiancia transmitida, el receptor será un difusor perfecto. Los difusores o emisores de Lambert o perfectos son aquellos cuya radiancia no depende de la dirección, siendo constante e independiente del ángulo con el que se observe.

Un superficie lambertiana es aquella en la que la distribución angular a la salida depende de $\cos \theta$, donde θ es el ángulo que forma con la normal al plano de la superficie. De esta forma se recoge por igual la radiación proveniente de toda la superficie; en el caso de que el receptor se comportara como reflector la intensidad luminosa detectada corresponderá en mayor medida a una zona del espejo y no a su totalidad.

Un buen receptor lambertiano se consigue con una superficie microgranulada y pintada de color blanco mate y un difusor perfecto se puede aproximar por medio de un material como el vidrio o un difusor de cuarzo. El vidrio puede estar tratado con arena para erosionar levemente la superficie, o bien recubrir el vidrio con una lámina de ópalo. A continuación podemos ver la ecuación de la intensidad radiante que refleja o transmite una superficie lambertiana en función del ángulo del observador.

$$\text{Ley de Lambert} \quad I_{\theta} = I_0 \cdot \cos \theta$$

I_0 intensidad radiante máxima perpendicular a la superficie
 θ ángulo que forma el observador con la perpendicular

Viendo las ecuaciones de la radiancia y la ley de Lambert, que nos indica la distribución angular a la salida de un difusor lambertiano, podemos demostrar que la radiancia no depende del ángulo con que captemos la imagen. Esto es debido a que la intensidad que proviene de la superficie lambertiana varía con respecto al ángulo que forma con la normal de la superficie, y la radiancia varía con respecto a la proyección del área en la dirección de observación. Por lo tanto, al depender la proyección del área del mismo ángulo de observación y ser la radiancia un cociente entre intensidad y la proyección del receptor, el ángulo de observación no varía la radiancia de un objeto.

En la práctica existen diferentes montajes para captar la mancha focal mediante una cámara CCD dependiendo de los colectores y receptores utilizados. En la figura siguiente podemos ver algunos de ellos en los que la cámara se sitúa en diferentes posiciones.

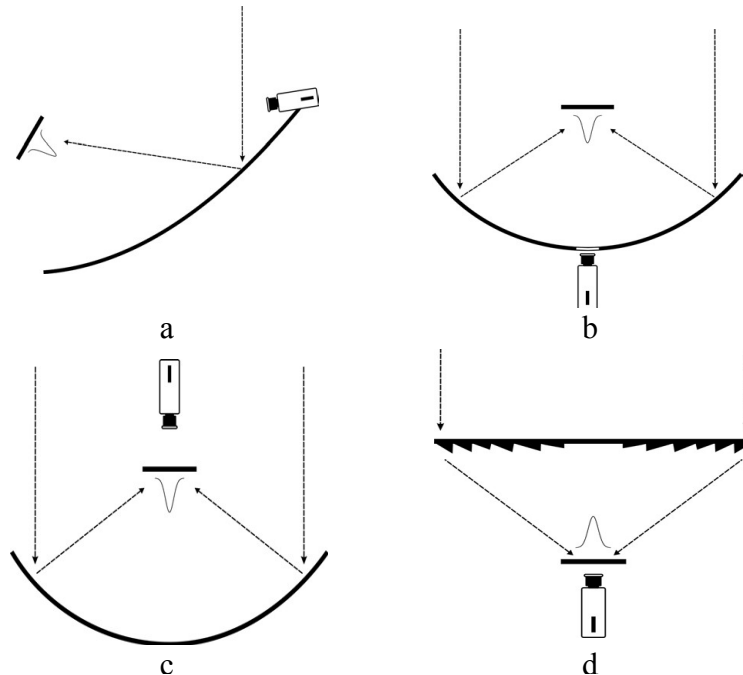


Figura 3.1 – Montajes para capturar el perfil de luz de diferentes colectores: (a) espejo parabólico lineal; (b) y (c) discos parabólicos y (d) lente de Fresnel

En la imagen *a* se representa un montaje con un espejo parabólico lineal en el que el receptor es un reflector lambertiano. Debido a esto la cámara no se puede colocar enfocando en línea recta al reflector por lo que deberemos inclinar la cámara y tomar la imagen con un determinado ángulo. Los montajes *b* y *c* utilizan espejos en forma de disco parabólico que concentran la luz en un punto. En uno de ellos se utiliza un difusor de cuarzo y se toma la imagen desde atrás, en el otro se utiliza un reflector y para captar la imagen se practica una abertura en el disco parabólico. Con ambos montajes se consigue captar la imagen perpendicular al receptor. En el último montaje se utiliza una lente de concentración Fresnel y un difusor de cuarzo con lo que la imagen se puede tomar perpendicularmente desde atrás.

Dado que esta aplicación solo se encarga de procesar imágenes tomadas por la cámara distinguimos dos montajes diferentes, aquel en el que la imagen es tomada perpendicularmente y en el que debemos inclinar la cámara y por lo tanto hará falta una corrección de perspectiva. Vamos a ver dos montajes basados en un módulo refractivo montados en un laboratorio que utilizan una fuente de luz artificial, una lente Fresnel como concentrador y un blanco mate o un difusor de cuarzo como receptores.

El primer montaje es más complicado, utiliza un blanco mate como receptor y la cámara capta la intensidad luminosa por reflexión. Debido a que no podemos colocar la cámara en línea recta con el receptor, debemos colocarla formando un ángulo con éste. El ángulo va a ser significativo debido a que la distancia focal es muy pequeña y la cámara debe colocarse al lado de la lente. La imagen siguiente nos muestra como sería este montaje.

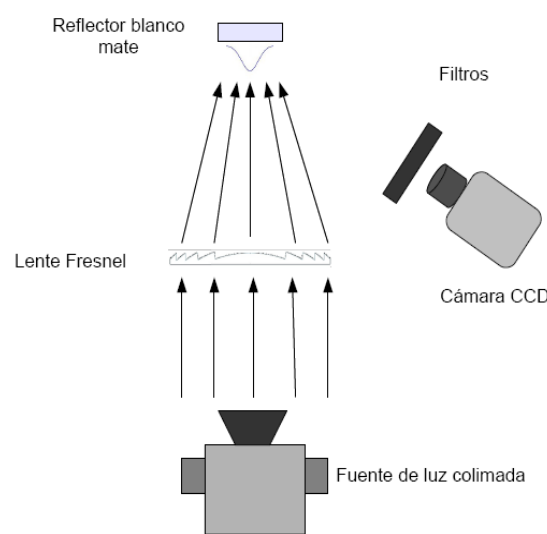


Figura 3.2 – Montaje en laboratorio con reflector blanco mate

El otro montaje utiliza un difusor traslúcido y por lo tanto podemos colocar nuestra cámara en línea recta con el receptor colocándola detrás de éste. Este montaje puede verse a continuación.

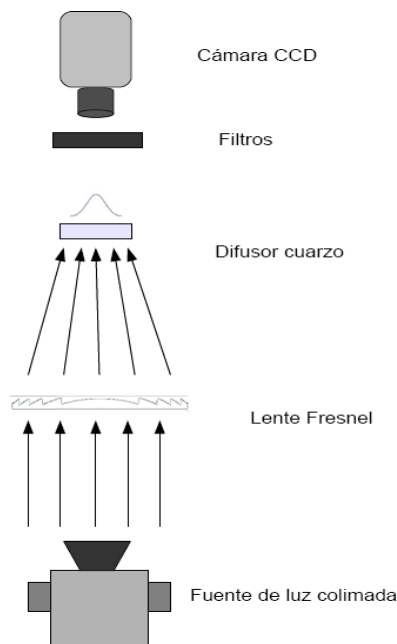


Figura 3.3 – Montaje en laboratorio con difusor de cuarzo erosionado con arena

3.3 Imágenes y transformación

Las imágenes que nos devuelve la cámara pueden ser muy diferentes dependiendo del tipo de concentrador que produzca el foco de luz. Así no serán iguales una imagen perteneciente a un colector espejo parabólico lineal con un concentrador puntual y por lo tanto se procesarán de forma diferente. Pero antes de proceder a procesar la imagen debemos ver si necesita algún tipo de corrección. Si la imagen ha sido tomada perpendicularmente al receptor no es necesario transformar la imagen, ya que ésta habrá captado la imagen tal y como se presenta en el receptor, únicamente con la distorsión o ruido que genera la cámara. En el caso de que la imagen haya sido capturada con un cierto ángulo es necesario realizar alguna transformación en la imagen.

Anteriormente hemos visto que debido a que utilizamos una superficie reflectora lambertiana, la luminancia no depende del ángulo con el que tomamos la imagen. Esto quiere decir que obtenemos una medida relativa de la irradiancia desde cualquier ángulo, que es lo que nos interesa porque queremos conocer la distribución espacial de la luz.

3.3.1 OBTENCIÓN PERSPECTIVA

El efecto de la perspectiva en la imagen tomada se manifiesta de manera que altera el tamaño y la forma de los objetos presentes en el receptor a captar. Esta alteración se debe a que las distancias de la cámara a los distintos puntos de la imagen no son iguales a si la imagen hubiera sido captada perpendicularmente. Los objetos cercanos a la cámara tienden a aparecer grandes en tamaño con respecto a los objetos lejanos; en la imagen se puede ver el efecto de tomar la imagen perpendicular (a) y con un ángulo distinto con respecto al plano del receptor (b).

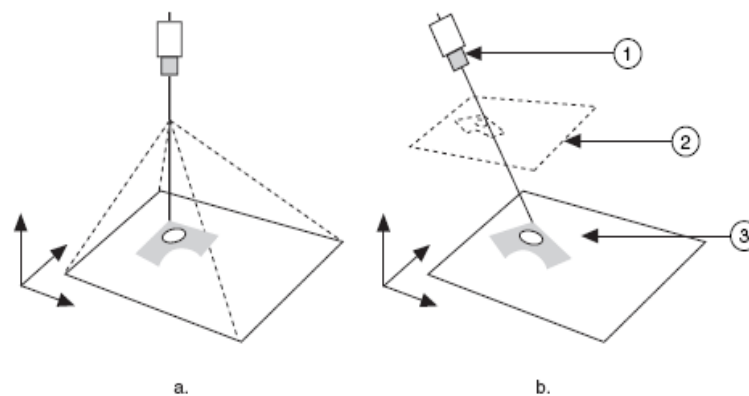


Figura 3.4 – Efecto de la perspectiva. (a) Imagen tomada perpendicularmente, (b) Imagen con un determinado ángulo respecto a la normal al plano

La diferencia de distancia de la cámara hasta los diferentes objetos presentes en la imagen depende de la ubicación de la cámara y del ángulo que ésta forme con el plano del receptor. Conociendo esos parámetros podemos corregir otras imágenes tomadas con el mismo montaje para representarlas y procesarlas como si hubiera sido tomada perpendicular al centro del receptor. En la figura siguiente podemos ver cuales son los parámetros que intervienen en la captura de una imagen con una determinada perspectiva.

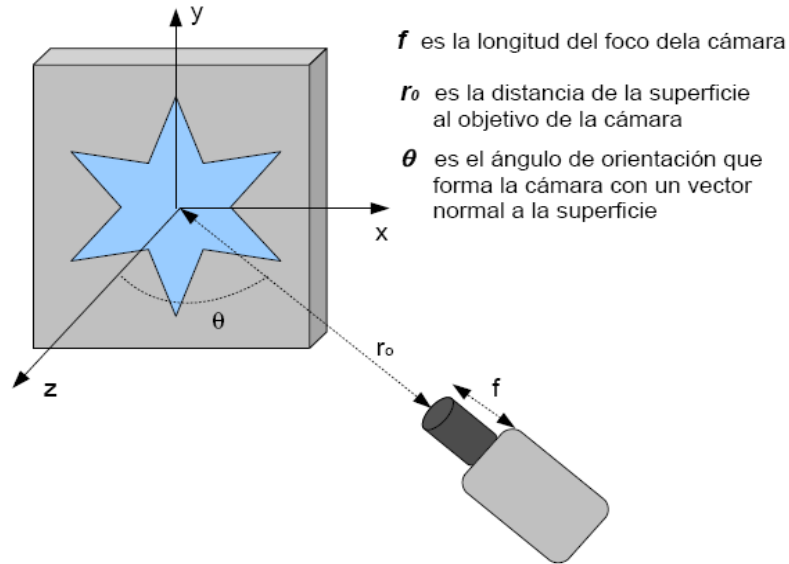


Figura 3.5 – Parámetros de los que depende la imagen capturada con una determinada perspectiva

Para la corrección de la perspectiva debemos transformar las coordenadas de la imagen tomada con una determinada perspectiva, en otras coordenadas que pertenecerían a la imagen tomada perpendicularmente. Los parámetros que debemos conocer son, el ángulo de captura de la cámara CCD (θ), la distancia entre la superficie y el objetivo (r_0) y la distancia del objetivo (f). La transformación de coordenadas se hace a través de las siguientes ecuaciones:

$$x = \frac{r_0 \cdot x'}{(x' \cdot \sin(\theta)) + (f \cdot \cos(\theta))}$$

$$y = \frac{r_0 \cdot x' \cdot \cos(\theta)}{(x' \cdot \sin(\theta)) + (f \cdot \cos(\theta))}$$

Para conocer estos parámetros de la perspectiva analizamos la relación de tamaños entre los elementos de la imagen, de los que sabemos las dimensiones en perspectiva normal. Una imagen que nos sirve para hallar las relaciones entre tamaños es una malla de puntos en la que la distancia entre ellos es conocida e igual tanto a lo largo de eje x como del eje y . Una vez tomada la imagen desde una determinada perspectiva, como se observa en la imagen b de la figura, medimos la distancia entre los centros de los puntos de la malla. Se observa en la figura que la distancia entre puntos horizontalmente es mayor en la parte baja de la imagen. El algoritmo relaciona las distancias reales entre

puntos que hemos introducido con las distancias medidas en la imagen y con ello conoce los parámetros de la perspectiva y puede corregir esa imagen y todas las que sean tomadas con la misma perspectiva.

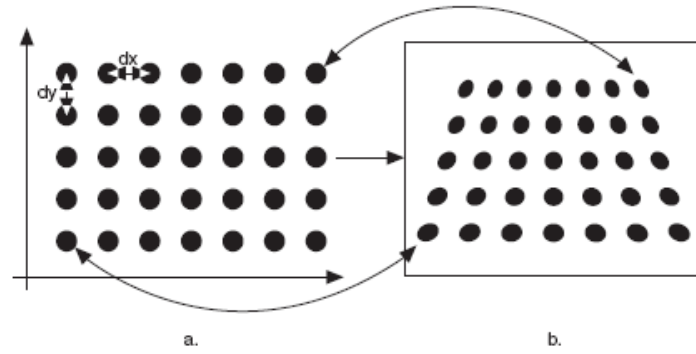


Figura 3.6 – Malla de puntos vista perpendicularmente y con una determinada perspectiva.

4. Procesado de las imágenes

4.1 Desarrollo matemático

El objetivo principal de la aplicación es la obtención de los perfiles de la imagen y con ello calcular la irradiancia y la irradiancia acumulada en el receptor. Para obtener los perfiles vamos a tener que realizar distintos cálculos, aparte de los específicos sobre el foco de luz, como son la calibración espacial y el cálculo de la perspectiva. Éstos son necesarios para el cálculo de los perfiles; la calibración espacial nos permite pasar distancias en píxel medidas directamente en la imagen a unidades de longitud del Sistema Internacional. Con el cálculo de la perspectiva podemos corregir una imagen y transformarla en otra equivalente a tomarla con la cámara perpendicular al receptor. Una vez que tengamos la equivalencia entre píxeles y unidades del Sistema Internacional y la perspectiva corregida, si fuera el caso, podemos procesar la imagen del foco de luz y extraer los perfiles y representarlos.

Para todos estos cálculos utilizamos una imagen captada por la cámara, ya sea de un foco de luz, un malla de puntos o una imagen con unos ejes, y para realizarlos transformamos la imagen en un array donde cada elemento es el valor del píxel para esa posición. Así podremos calcular la distancia entre dos píxel cuyos valores nos interesan o también comparar valores, elegir máximos y realizar cálculos con valores de los píxel que nos interesen.

4.1.1 CALIBRACIÓN ESPACIAL

El propósito de la calibración espacial es relacionar los píxel de la imagen de foco con sus dimensiones reales.

La implementación de la calibración es bastante sencilla, basta con dividir el número de píxel en la imagen entre su correspondencia en unidades del Sistema Internacional. Para ello se sustituye en el foco del sistema óptico el receptor lambertiano por una plantilla con unidades espaciales conocidas (por ejemplo una cuadrícula milimétrica), y se captura dicha imagen, de la que se obtiene las dimensiones del píxel o constante de calibración espacial. En realidad hacen falta dos constantes en el caso de que los dos ejes tuvieran diferente escala (K_x y K_y) como consecuencia de que la imagen hubiera sido tomada con una determinada perspectiva. Si se realiza la corrección de perspectiva ambas constantes son iguales ($K_x = K_y = K$). La constante de calibración espacial es, por tanto:

$$K = N^{\circ} \text{ píxel eje} / \text{distancia mm}$$

4.1.2 PROCESADO

El procesamiento tiene como objetivo hallar el perfil de intensidad de la luz sobre el receptor, tanto el lineal como el acumulado. Se obtienen a partir de la irradiancia total sobre el receptor ($I(x,y)$). Este tipo de representación, denominado *mapa de superficie*, muestra con detalle la falta de uniformidad de la irradiancia en el receptor, pero resulta poco manejable. Podemos ver esta representación en la figura siguiente perteneciente a un montaje con colector lineal.

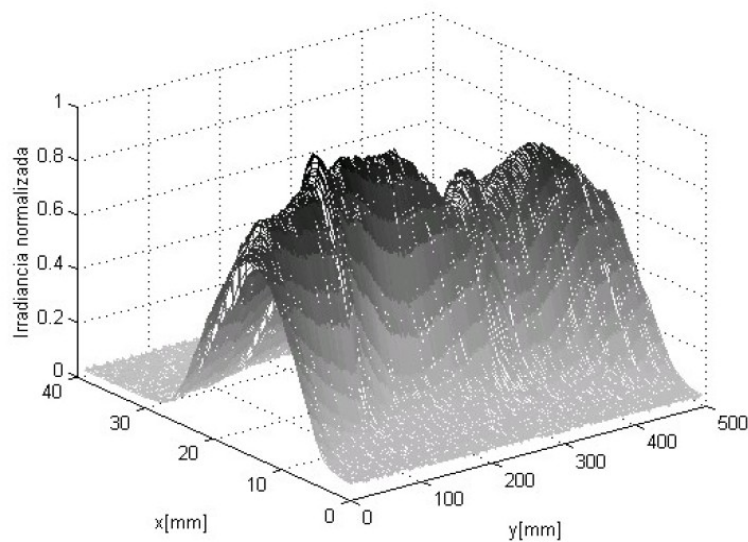


Figura 4.1 – Mapa de superficie de la irradiancia sobre el receptor de un concentrador lineal

Una representación más sencilla y más útil, es la que logramos con los *perfiles de irradiancia* [3]. El perfil lineal representa la distribución de luz para cada distancia al centro y el perfil acumulado que representa la luz contenida en relación a la distancia también al centro. Por lo tanto el acumulado será la integral del perfil lineal o lo que es lo mismo para una distancia dada será la suma de todos los valores del centro del foco hasta esa distancia.

Empezamos el procesamiento *calculando el centro del spot*, que se corresponde a la zona en la que la irradiancia es la mayor de toda la imagen. Este centro será diferente dependiendo del tipo de concentrador que estamos utilizando, en el caso de un

concentrador lineal será una línea a lo largo del foco de luz y en el caso de concentrador de foco puntual será un punto. Para ello obtenemos un umbral (típicamente la mitad del valor máximo de irradiancia en la imagen) y guardamos las coordenadas de los puntos o líneas, dependiendo del tipo de colector, que tienen un valor mayor que ese umbral. El centro del spot se define como el centro del área anterior.

Opcionalmente puede ser necesario seleccionar solo una parte de la imagen, dependiendo del tamaño del foco de luz en comparación con la imagen. En caso necesario se realizará, por tanto, un recorte de la zona útil de la imagen, desechando el resto

El siguiente paso a realizar sería la *eliminación del ruido de fondo* y la normalización de la imagen. El ruido de fondo es el valor de irradiancia en la imagen que no es debido al foco de luz sino al ruido térmico de la cámara o a luz indirecta. El valor de éste es igual al valor máximo de la imagen fuera del área útil que hemos seleccionado, y restando este valor a nuestra imagen conseguimos eliminar el ruido de fondo. Hay que tener en el ruido, en un sistema de cuantificación, tiene valor medio no nulo. Supongamos una CCD con un conversor de 12 bits, que proporciona valores entre 0 y 4096. Si está bien expuesta la fotografía, los valores máximos de la señal estarán próximos a 4096 y los valores mínimos a cero. Sin embargo, en las zonas oscuras es habitual encontrar valores no nulos. Este ruido, aunque sea de poco valor, cuando se integra en zonas muy grandes de la imagen puede tener una repercusión muy importante es los resultados. Por ejemplo, en un sistema de foco puntual, a medida que nos alejamos del centro del foco la señal se hace más pequeña pero el área diferencial crece. Para eliminar el ruido se calcula el valor medio del mismo en zonas de la imagen cuyo valor debería ser cero (completamente negro) y se resta dicho valor a toda la imagen. Por tanto, la imagen filtrada tiene valores negativos en algunos píxeles de las zonas oscuras, de tal forma que cuando se integra un área oscura el resultado debe ser cero.

Ahora ya tenemos preparado el array para calcular los perfiles de irradiancia y de irradiancia acumulada. El análisis es diferente dependiendo del tipo de colector, ya que para el cálculo de los perfiles con colectores lineales utilizaremos coordenadas cartesianas y para el caso de foco puntual coordenadas polares. Esto es debido a que para calcular los perfiles de un foco lineal lo hacemos con respecto a una sola dimensión espacial, y si es puntual la irradiancia la representamos con respecto al radio, por lo que es más fácil de esta manera.

El perfil de irradiancia en un colector lineal lo representamos con respecto al ancho del haz de luz concentrada (eje x), por tanto integraremos la irradiancia total en el receptor ($I(x,y)$) sobre el largo (eje y). A continuación podemos ver la ecuación de irradiancia promediada que representa este perfil:

$$I(x) = \frac{1}{y_{\max}} \cdot \int_0^{y_{\max}} I(x, y) dy$$

Esta función se representa normalizada respecto a su valor máximo y a lo largo del receptor, en la que tomaremos como centro del eje x el centro que hemos calculado antes y que coincide con la zona del spot de luz con más irradiancia. Así hacia arriba o izquierda del centro se encontrará el semi-eje negativo y hacia abajo o derecha el semi-eje positivo. En la figura siguiente podemos ver una representación de la distribución de irradiancia promedio sobre un receptor en un montaje con concentrador lineal.

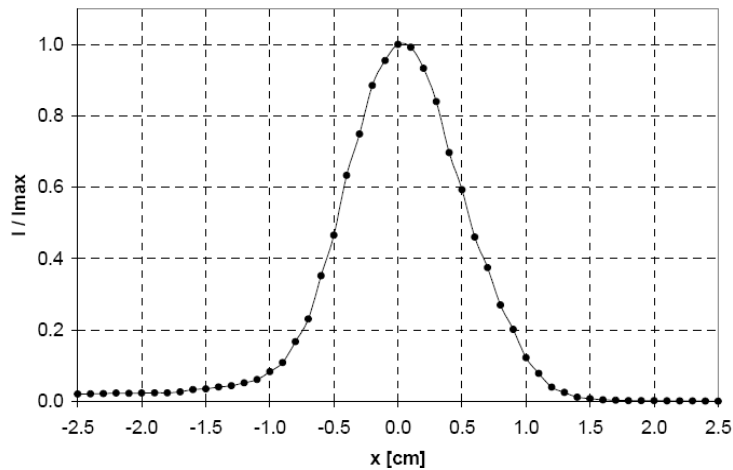


Figura 4.2 – Distribución de la irradiancia en el receptor de un colector lineal (perfil de irradiancia)

A partir del perfil de irradiancia promedio calculado anteriormente podemos determinar la energía acumulada en función del tamaño del colector (al ser lineal, en función de la anchura x del mismo). La irradiancia acumulada en función de la semi-anchura del receptor se obtiene a partir de la expresión:

$$F(x) = \int_{-x}^0 I(x) dx + \int_0^x I(x) dx$$

Al igual que para la irradiancia promediada, el perfil acumulado también se representa normalizado. Así pues, dividiendo $F(x)$ entre el valor máximo y

representándola respecto a la anchura total de éste en vez de la semi-anchura obtenemos $f(x)$, que se muestra en la figura siguiente.

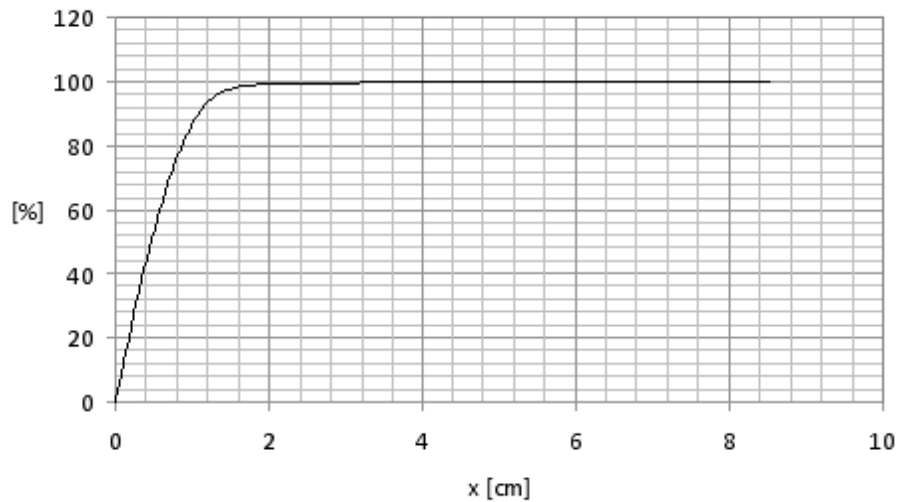


Figura 4.3 – Irradiancia acumulada normalizada (perfil acumulado), en función de la anchura total

Aunque la técnica de caracterización es la misma para un colector con simetría de rotación o de foco puntual, la presentación de los datos es diferente que en el caso anterior debido a su simetría circular, por lo que utilizaremos coordenadas polares. De esta manera a partir de la irradiancia $I(x,y)$ en coordenadas rectangulares podemos obtener la irradiancia acumulada en función del radio $F(r)$, utilizando la conversión a polares. A continuación se muestra el cambio de variable y la función resultante de este cambio siendo D la circunferencia de radio r .

$$F(r) = \iint_D I(x, y) dx dy$$

$$x = r \cdot \cos(\theta)$$

$$y = r \cdot \sin(\theta)$$

El método de integración por sustitución en integrales múltiples establece que, cuando se establece otro sistema de coordenadas, debe tenerse en cuenta la matriz de conversión jacobiana (J) que en el caso de conversión a polares es la siguiente.

$$dx dy = J dr d\theta$$

$$J = \det \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -r \sin(\theta) \\ \sin(\theta) & r \cos(\theta) \end{bmatrix} = r \cos^2(\theta) + r \sin^2(\theta) = r$$

$$dx dy = r dr d\theta$$

Sustituyendo en la ecuación anterior obtenemos el perfil acumulado en función de las coordenadas polares, el resultado se muestra en la función de a continuación.

$$F(r) = \int_0^{2\pi} \int_0^r I(r, \theta) r dr d\theta$$

Al igual que para los colectores lineales, se representa normalizada y de forma porcentual. En la gráfica vemos la irradiancia acumulada normalizada del colector en relación con el tamaño del receptor.

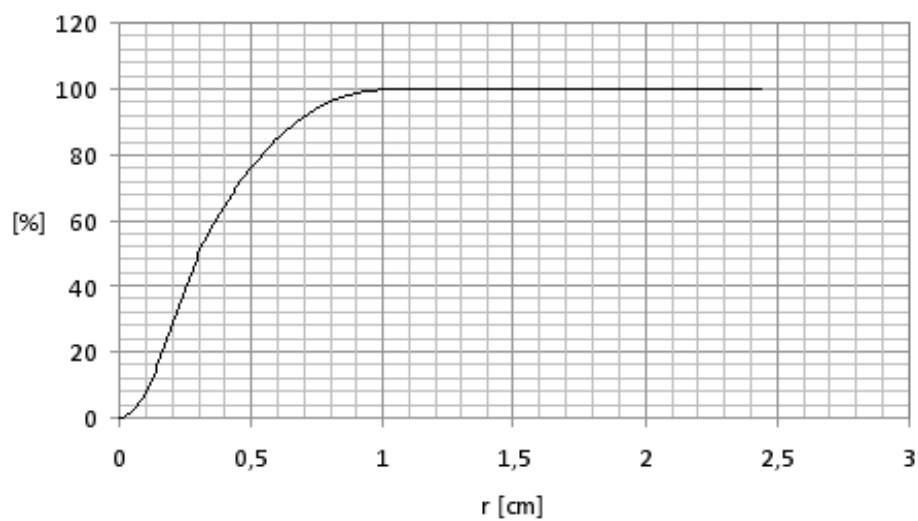


Figura 4.4 – Irradiancia acumulada normalizada en función del radio del receptor

Otra representación muy ilustrativa es la irradiancia promedio, que es la derivada de la acumulada normalizada respecto a su valor máximo, la cual indica la contribución de cada corona circular diferencial centrada en r . Podemos ver su expresión y su representación en la figura siguiente.

$$F(r) = \frac{dF(r)}{dr}$$

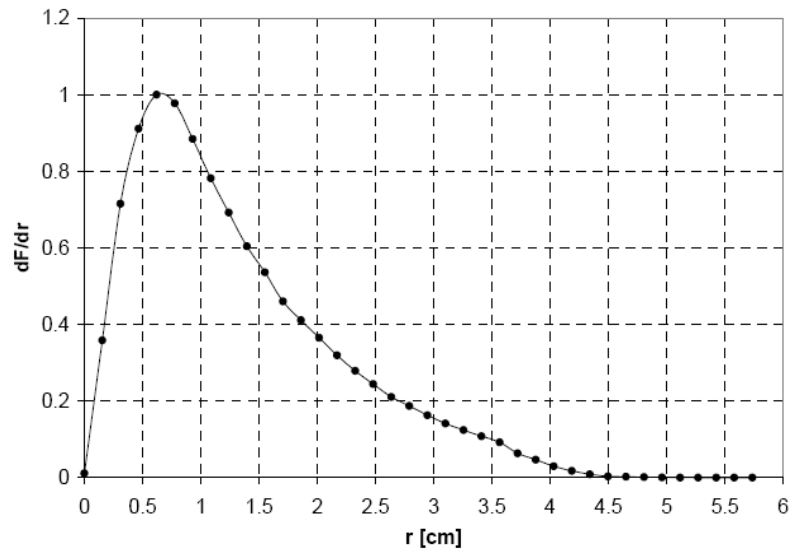


Figura 4.5 – Distribución de la irradiancia promedio en función del radio del receptor

En cualquiera de los casos de este procesado, concretamente del perfil acumulado, se obtiene el tamaño mínimo del receptor necesario para recoger toda la luz. Con éste y conociendo el tamaño del colector podemos calcular la concentración para un colector dado y con ello saber si es suficiente, si necesitamos un secundario o mejorar el proceso de fabricación.

5. Aplicación

A continuación se explica cómo realizar los cálculos y acciones necesarias para procesar las imágenes y obtener los perfiles, cuyo desarrollo matemático hemos explicado anteriormente. Para programar la aplicación se ha utilizado *Labview*, que es una herramienta software desarrollada por *National Instruments* para la creación de aplicaciones de adquisición de datos y control.

El software se ha desarrollado mediante programación por **eventos**, lo que quiere decir que el programa está en reposo mientras que no se realice alguna acción que se haya definido en el programa. Este tipo de programación permite que sea el usuario el que dirige el flujo del programa, esto es, la secuencia de cada parte del código.

La estructura de eventos en Labview funciona de manera que duerme la ejecución del programa hasta que ocurre un evento, y cuando éste sucede ejecuta la rutina correspondiente a dicho evento. La programación con eventos ofrece varias ventajas sobre la programación cíclica y una de ellas es que no hace **polling** sino que sería similar a generar una interrupción. El *polling* en computación hace referencia a una operación de sondeo constante sobre un dispositivo o sobre recursos software, y todas estas consultas degradan el rendimiento del equipo ya que saturan el microprocesador. Otra ventaja sería el hecho de que todos los eventos que se generan son captados, de otro modo se podrían perder si coincidiera el suceso que queremos captar mientras se estuviera ejecutando una parte del programa. Por último nos asegura que los eventos captados se ejecutan en el mismo orden en el que fueron generados, ya que se crea una cola de eventos en el que el último en generarse se ejecuta al final.

Existen diferentes tipos de eventos que se dividen en dos categorías: los eventos de **filtración y notificación**. Los eventos de filtración son principalmente los eventos generados por medio de la interfaz del usuario, y están asociados a un objeto en concreto, utilizan y cambian datos de la aplicación según se ha programado dicho evento. Los eventos de notificación son eventos generados por la aplicación, no están asociados a un objeto en concreto sino que se disparan desde el mismo código una vez que ha ocurrido un determinado hecho durante la ejecución. Por ejemplo, eventos de teclas, eventos de ratón, eventos del menú, y el evento para cerrar la ventana principal son todos eventos de filtración.

5.1 Diagrama de flujo de la aplicación

La aplicación se divide principalmente en siete grandes bloques, que se encargan de realizar una función dentro de todo el sistema de procesado. Cada una de estas funciones realiza una tarea dentro del sistema que puede ser necesaria para cada ejecución del programa, para cada procesamiento o solo opcional.

Una vez lanzada la aplicación el programa se queda esperando que ocurra algún evento. En este caso todos los eventos registrados que se han programado son acciones que realiza el usuario en la interfaz gráfica. Los eventos registrados son los relativos a seleccionar alguna pestaña del menú o presionar algún pulsador de los submenús. En el caso de que el evento que se ha producido no corresponda a ninguno de estos el programa vuelve al estado de espera. Abajo podemos ver el diagrama de flujo general de la aplicación sin especificar ninguna de sus funciones.

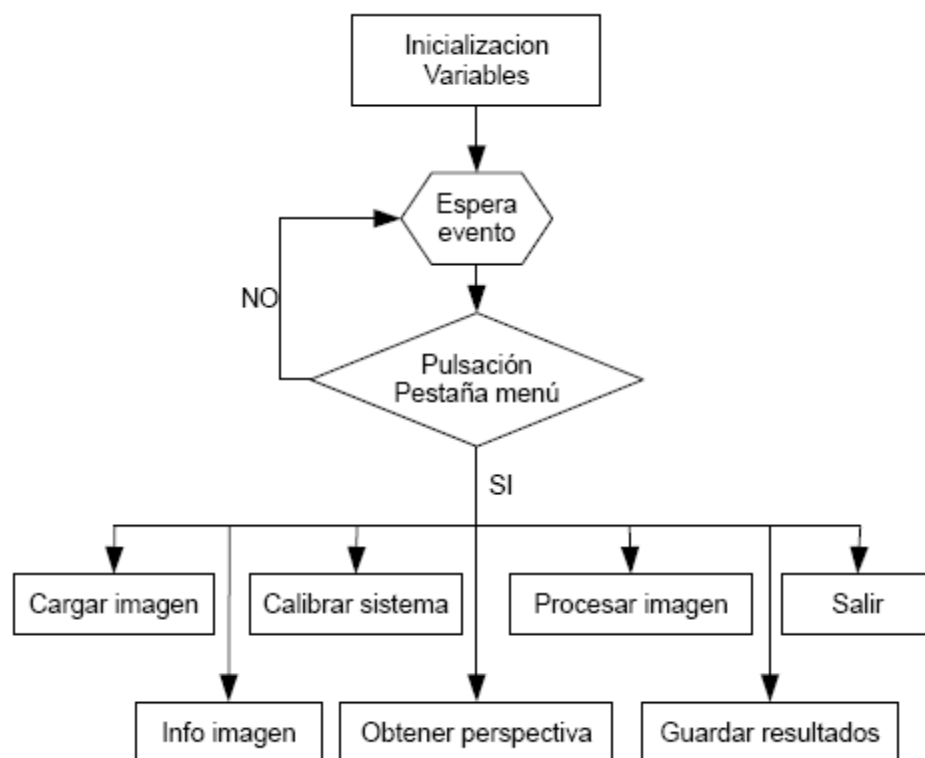


Figura 5.1 – Diagrama de flujo de la aplicación principal

5.1.1 Inicialización variables

Consiste en inicializar todas las variables que se van a utilizar durante la ejecución del programa, tanto las variables que sirven para su correcto funcionamiento, como los botones que sirven para ejecutar los diferentes eventos y también las imágenes y sus regiones de interés (ROI's). Además se inicializa el panel frontal para que tenga la misma apariencia cada vez que se ejecute. Se ha fijado para que se muestre la IMAGEN DEL FOCO y en la pestaña de opciones la correspondiente a la información de la imagen del foco (menú INFO).

5.1.2 Esperar evento.

Este no es un bloque como tal, sino que es un estado en el cuál el sistema está esperando a que se produzca algún evento, permaneciendo en reposo mientras no se produce ninguno.

En el programa los eventos serán del tipo *filtración*, y son principalmente eventos de ratón sobre los controles, los menús o sobre las imágenes que hemos cargado durante la ejecución del programa. Si sucede alguno de los eventos que hemos programado el programa ejecuta el código asociado al mismo.

5.1.3 Cargar imagen foco

Esta parte del programa muestra sus opciones al pulsar con el ratón en el menú la pestaña “Cargar”, con lo que se accede a un submenú que contiene los controles para cargar la imagen. Además se muestra en la pantalla un mensaje para el usuario en el que se explican los pasos a seguir para realizar esta función.

Esta acción se encarga de elegir la imagen que se quiere procesar, mostrarla por pantalla y extraer los datos pertenecientes a la imagen señalada para su utilización posterior. En el submenú se nos presentan las opciones a elegir y el pulsador para realizar la acción de cargar la imagen del foco que queremos procesar. Las opciones a elegir son: el tipo de concentrador del que se ha extraído la imagen que como hemos comentado anteriormente serán de foco puntual y de foco lineal; y el tipo de imagen que queremos cargar que dependerá de si es de 16 o de 8 bits.

5.1.4 Calibrar el sistema

La calibración del sistema obtiene una relación entre los píxel de la imagen y su equivalente en medidas reales. Esta acción es necesario realizarla por lo menos una vez en cada ejecución de la aplicación.

Al pulsar en el menú la pestaña calibrar, nos aparece un mensaje con información y los pulsadores necesarios para ejecutar las acciones “Iniciar calibración” y “Ok calibración”. Si en la imagen no fueran los ejes proporcionales, debido a cualquier distorsión, podríamos conseguir una constante diferente para cada uno de ellos, pero esta corrección se realiza cuando se corrige la perspectiva y por lo tanto solo nos hace falta conocer una constante “ K ”, que se expresa en píxel por milímetro.

5.1.5 Información de la imagen

En esta parte se muestra información relativa a la imagen que hemos cargado y controles para seleccionar parámetros para el procesado.

La información de la imagen que se muestra es el tamaño o resolución y el rango de valores (máximo y mínimo) que se han obtenido al cargar la imagen. También se muestran otros datos relativos a la imagen necesarios para realizar el procesado que son el centro del foco y el área útil. Estos datos se obtienen seleccionándolos en la imagen y con los pulsadores de cálculo del centro y selección de área. Estos dos parámetros se muestran también en la imagen

5.1.6 Procesar imagen

El procesado de la imagen utiliza los datos generados por otras partes del programa para obtener el perfil de intensidad y el perfil acumulado, que es realmente la finalidad del programa.

El procesado de la imagen comprende varias acciones distintas, que son la obtención de los perfiles de irradiancia y el mapa de superficie. Para la obtención de los perfiles es necesario filtrar el ruido en la imagen, cuyo origen es el ruido térmico en la CCD o luz ambiente que no proviene del sistema óptico. Existe una opción para realizar el procesado con el ruido de fondo introducido manualmente. Se muestra el mapa de superficie de la imagen entera y del área útil seleccionada, interpolando los valores de los píxel para dar una apariencia de gráfica continua.

Los perfiles pueden guardarse en diferentes tipos de archivos dependiendo del uso que vayamos a darle.

5.1.7 Perspectiva (Obtener y corregir perspectiva)

Esta pestaña del menú, tiene las opciones necesarias y los controles para obtener la perspectiva con la que se ha tomado una imagen y posteriormente aplicarle los parámetros que hemos obtenido a otras imágenes tomadas con la misma perspectiva, corregirla y mostrarla corregida. Una vez corregida se puede procesar como cualquier otra imagen tomada por la cámara o perteneciente un archivo.

Para la obtención de los parámetros relativos a la perspectiva necesitamos crear una plantilla, que será una malla de puntos en los que la distancia entre puntos en un mismo eje (x e y) debe ser la misma. De esta manera será lineal, es decir que la distancia entre puntos es linealmente proporcional en toda la imagen. Las distancias entre puntos en cada eje deben ser conocidas para poder ser comparadas con los que mide de la imagen tomada con una determinada perspectiva.

Una vez tenemos los valores de la perspectiva cargamos otra imagen, en este caso la imagen que queremos corregir. Ésta será la imagen del foco capturada con la misma perspectiva que la malla de donde hemos sacado los valores de la perspectiva. Una vez corregida la imagen se muestra en la pestaña principal de la imagen del foco, y está lista para ser procesada como una imagen cargada desde cualquier fichero.

5.1.8 Salvar datos

Esta acción sirve para guardar los datos del valor de los píxel, así que si no se ha cargado ninguna imagen, esta parte no tiene sentido y aparece un mensaje de texto explicándolo. Las opciones que tenemos para guardar todos los valores de los píxel son dos: guardarlos en un documento de texto o en un documento de Excel. Los valores se guardan en el fichero con tabulación entre elementos de una misma fila y con retorno de carro entre columnas.

5.1.9 Salir

Esta parte del menú solo sirve para dejar de ejecutar la aplicación, liberar espacio de memoria de las variables e imágenes. Para ello cuando pinchas sobre el submenú aparece un mensaje en el que emplaza al usuario a pulsar el botón de salir..

5.2 Descripción funcional de la aplicación

5.2.1 Identificación del panel principal

A continuación se verán los pasos a seguir para realizar un correcto procesado de las imágenes que han sido tomadas por la cámara. Al ejecutar el programa se mostrará el panel principal de la aplicación. Este panel es la interfaz de la aplicación con el usuario, donde se muestran los resultados y los pulsadores para introducir ordenes. El panel contiene varias pestañas relacionadas con las diferentes funciones que componen la aplicación. En la figura siguiente podemos ver una imagen del panel en el que podemos ver los distintos objetos que lo componen.

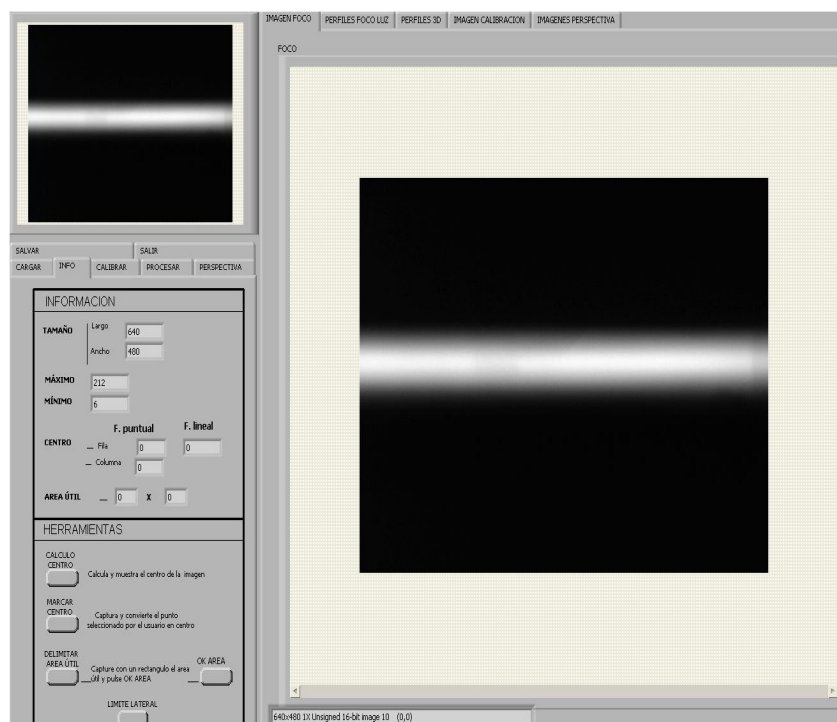


Figura 5.2 – Imagen de panel frontal de la aplicación

Como se puede distinguir en la imagen hay tres partes en el panel, a la derecha se encuentra la parte dedicada a representar los resultados y visualizar las imágenes que se cargan para las distintas funciones del programa. A la izquierda en la parte superior siempre se muestra la imagen del foco para procesar escalada a su tamaño fijo, de esta manera se podrá visualizar siempre entera aunque la imagen tenga un tamaño mucho mayor. Debajo de esta imagen se encuentran los controles y variables de las diferentes funciones organizadas en pestañas. La ejecución de alguna de estas funciones lleva asociada la visualización de una imagen o de un resultado de la parte derecha del panel. Así pues dependiendo de lo que estemos realizando en el menú de la izquierda se visualizará una cosa u otra en la representación de la derecha.

Las pestañas del menú son las mismas que las diferentes funciones que realiza la aplicación: cargar imagen, información de la imagen, calibrar el sistema, obtener perspectiva, procesar imagen y salvar datos. Y las pestañas de visualización y resultados son: imagen del foco, imagen para calibración, imágenes perspectiva, perfiles foco de luz y perfiles 3D.

A continuación se explica como se debe ejecutar la aplicación para su correcto funcionamiento, las funciones que son necesarias cada procesado y las que son opcionales o con una ejecución es suficiente. Para cargar la imagen pulsamos en la pestaña con el mismo nombre y, a la vez que se nos muestran las opciones para esta función, nos muestra un mensaje por pantalla dirigido al usuario con las instrucciones a seguir. En el capítulo siguiente explicaremos las opciones y las acciones a efectuar para la realización de esta función.

5.2.2 Cargar y visualizar imagen del concentrador

En esta parte del programa se selecciona el tipo de imagen, el tipo de concentrador al que pertenece y el directorio donde se encuentra el archivo. Muestra la imagen por pantalla y la deja preparada para tratar.

Las opciones que se permiten se muestran por medio de unos desplegables en los que debemos seleccionar el tipo de imagen y de concentrador al que pertenece. Una vez seleccionadas las opciones posibles pulsamos el botón “*Cargar imagen*”, nos aparecerá un cuadro de diálogo en el que debemos seleccionar el directorio donde se encuentra y la imagen se mostrará en el panel principal. En la figura siguiente se puede ver la parte del panel perteneciente al submenú “*Cargar*” con una de las opciones desplegadas.

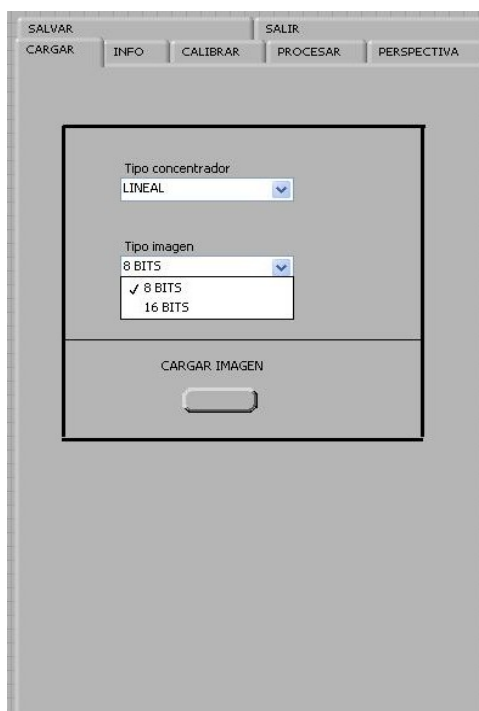


Figura 5.3 – Imagen del menú “Cargar imagen”

Durante la ejecución del programa se deberá realizar esta tarea tantas veces como imágenes de distintos concentradores queramos procesar. Después de tener la imagen cargada debemos elegir algunos parámetros para realizar el procesado.

5.2.3 Elegir parámetros y mostrar información de la imagen

Con la imagen cargada se pulsa sobre la pestaña “*Info*” del menú para que se muestre la información relacionada con la imagen y las herramientas para seleccionarla. En este apartado se pueden distinguir dos partes, la inferior donde se encuentran los pulsadores para realizar las acciones necesarias para la obtención de los parámetros necesarios y la parte de arriba para visualizarlos. La información relativa al tamaño de la imagen y sus valores máximo y mínimo, se obtuvo en el apartado anterior y se muestran directamente sin que el usuario tenga que realizar ninguna acción. Podemos ver en la figura siguiente este apartado del menú principal

The image shows a software interface for image processing. At the top, there are tabs: SALVAR, CARGAR, INFO, CALIBRAR, PROCESAR, and PERSPECTIVA. The 'INFO' tab is selected. Below the tabs is a section titled 'INFORMACION'. It contains several input fields: 'TAMAÑO' with 'Largo' and 'Ancho' (both set to 0), 'MÁXIMO' (set to 0), 'MÍNIMO' (set to 0), 'CENTRO' with 'Fila' and 'Columna' (both set to 0), and 'AREA ÚTIL' with 'X' and 'Y' (both set to 0). Below this is a section titled 'HERRAMIENTAS'. It contains four buttons: 'CALCULO CENTRO' (Calcula y muestra el centro de la imagen), 'MARCAR CENTRO' (Captura y convierte el punto seleccionado por el usuario en centro), 'DELIMITAR AREA ÚTIL' (Capture con un rectángulo el área útil y pulse OK AREA), and 'OK AREA' (OK AREA). There is also a 'LIMITES LATERALES' button at the bottom.

Figura 5.4 – Panel frontal del menú “Información de la imagen”

Es necesario realizar dos acciones en la imagen en este apartado: marcar el centro y delimitar el área útil. Estas acciones se pueden realizar en el orden que se quiera pero se deberán realizar las dos ya que, en caso contrario, no se realizará el procesado. Para marcar el centro se pueden utilizar dos pulsadores, dependiendo de como se quiera hacer. Se puede realizar un cálculo automático del centro del spot y visualizarlo en la imagen, con el pulsador “*Cálculo Centro*”; o por el contrario se puede hacer manualmente fijando un punto sobre la imagen y con el pulsador “*Marcar Centro*”. Dependiendo de si la imagen del concentrador es lineal o de foco puntual la visualización del centro será de una línea o un punto. Una vez realizado, la información relativa al centro de la imagen aparecerá en la parte de arriba en el marcador “*Centro*” en el apartado correspondiente al tipo de concentrador.

El otro parámetro necesario para el procesado es el área de la imagen donde se encuentra el foco. Los tres pulsadores de la parte inferior sirven para marcar en la imagen este área, y dependiendo del tipo de concentrador al que pertenece la imagen utilizaremos unos u otros. Lo primero que se debe hacer es presionar el pulsador “*Delimitar área útil*” y según el tipo al que pertenezca la imagen nos aparecerá un

mensaje por pantalla con las instrucciones a seguir. En el caso de foco puntual se debe seleccionar un rectángulo que contenga la zona a tratar. Para ello se fija como herramienta para la imagen aquella que permita dibujar rectángulos arrastrando con el ratón, una vez hecho esto presionamos el pulsador “OK área” y con ello quedará seleccionada dicho área. Si se trata de un concentrador lineal se debe señalar una sección transversal de la imagen y para ello se selecciona como herramienta el cursor. Se marca en la imagen el punto donde queremos que se sitúe uno de los límites de la zona a procesar y pulsamos “Límite lateral”. Se debe hacer esto dos veces por lo menos para fijar los dos límites laterales, en caso de realizarlo más veces se borrarían los límites más antiguos y se marcarían los nuevos. Esta información se muestra en la parte de arriba en el apartado “Área útil”.

Una vez que se han efectuado estas dos acciones la imagen está preparada para poder ser procesada, cada vez que se cargue una nueva imagen se deberán realizar estas acciones.

5.2.4 Calibración espacial del sistema

Esta parte del programa se encarga de obtener la constante de proporcionalidad entre pixel de la imagen y milímetros y utilizarla para generar los resultados del procesado. Esta calibración se debe realizar por lo menos una vez cada vez que se ejecute el programa y para ello necesitamos una imagen patrón en la que se pueda distinguir algún tipo de eje o malla. El menú de la calibración puede verse en la siguiente figura. En la parte de arriba se encuentran los controles y en la parte de abajo se muestra el valor de la constante de proporcionalidad.

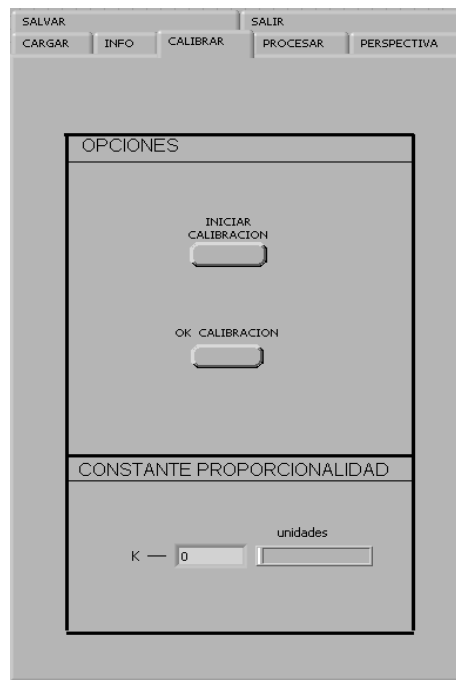


Figura 5.5 – Panel frontal del menú “Calibrar”

La calibración necesita una imagen con unos ejes conocidos que se selecciona al pulsar “*Iniciar calibración*”, que además fija la herramienta asociada a la imagen para dibujar líneas. Una vez cargada la imagen se presenta por pantalla y con el cursor se dibuja una recta con ayuda de los ejes. Un ejemplo de este proceso puede verse en la figura siguiente.

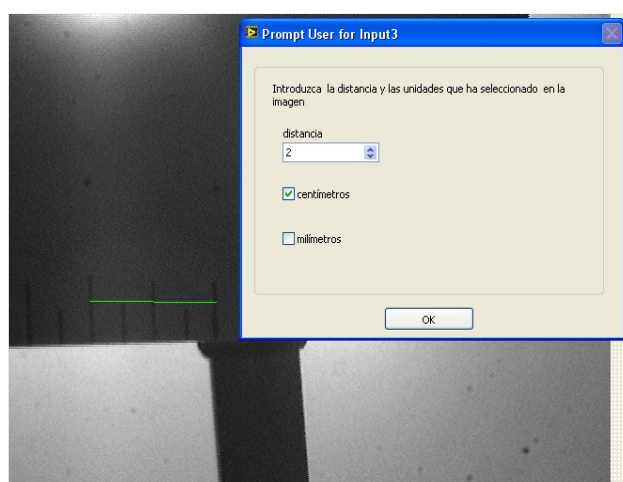


Figura 5.6 – Imagen del mensaje donde se debe introducir la distancia en milímetros

Cuando se ha dibujado la línea se pulsa “OK eje” y se muestra una ventana para introducir la longitud de la línea en milímetros. A continuación se calcula la constante y se muestra en la parte de abajo.

Una vez realizada la calibración del sistema no necesita repetirse a no ser que hubiera sido errónea o que se utilice una plantilla de otro montaje diferente.

5.2.5 Obtención y corrección de la perspectiva

Este proceso de la aplicación no es obligatorio ejecutarlo, siendo necesario sólo en los casos en los que la imagen haya sido tomada con una determinada perspectiva y se quiera corregir. Para corregir la perspectiva de la imagen del concentrador se debe realizar la captura de una imagen desde la misma posición, pero en lugar de capturar el foco de luz se coloca una malla de puntos equidistantes entre si. De esta imagen se obtienen los parámetros de la perspectiva al relacionar la distancia real conocida entre puntos en cada eje de la malla y las distancias medidas en la imagen. Una vez que se hallan estos parámetros de la perspectiva se aplican a la imagen del concentrador, se corrige la imagen y se presenta por pantalla. Una vez hecho esto la imagen está preparada para ser procesada igual que si se utilizara una imagen de un archivo.

El menú con los controles y la información necesaria para realizar la obtención y corrección de la perspectiva se muestra a continuación. Al igual que con los otros procesos cuando se pulsa sobre la pestaña correspondiente aparece un mensaje por pantalla indicando cuales son los pasos a seguir para poder realizar correctamente la corrección de la perspectiva. El menú se divide en una parte superior con las opciones y el pulsador encargados de la obtención de la perspectiva; y en la parte de abajo los pulsadores para aplicar esta perspectiva a la imagen de interés.

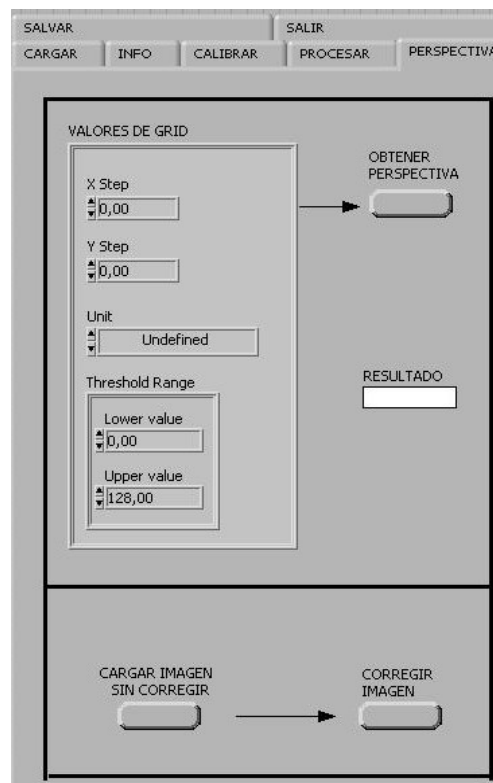


Figura 5.7 – Panel frontal del menú “perspectiva”

Para obtener la perspectiva se introducen los valores reales de la malla original para compararlos con los que se obtienen al analizar la imagen. Estos valores se pueden ver en la figura anterior y son la distancia entre puntos en cada uno de los ejes y las unidades en que se mide esta distancia. Otros valores son necesarios para un buen cálculo de la perspectiva, el valor máximo y mínimo de los puntos de la malla en la imagen. Estos valores son necesarios para que la aplicación pueda detectar todos ellos y medir distancias correctamente. Una vez que hemos introducido todos los valores de la malla se pulsa “Obtener perspectiva”, aquí el programa nos pedirá la ruta de la imagen con la malla y una vez seleccionado obtendrá los valores de la perspectiva. Puede ocurrir que alguno de los parámetros no sea correcto o que no tenga el valor adecuado, por eso el programa nos indica con un resultado si se ha realizado correctamente. En caso de que no, se muestra un mensaje por pantalla en el que se explica el fallo que ha ocurrido y los valores que hay que cambiar para lograr procesarlo correctamente. En la imagen siguiente se pueden ver los valores que se han introducido y como el resultado es correcto.

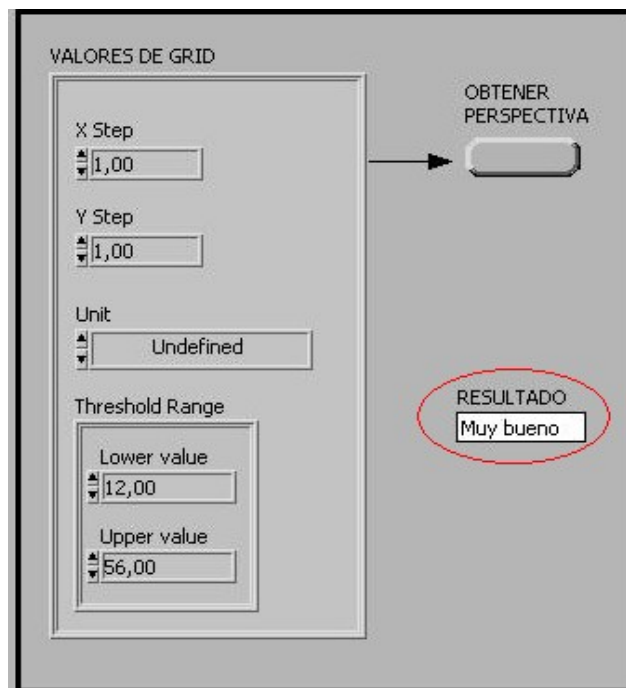


Figura 5.8 – Detalle de los parámetros del grid y del resultado obtenido

Cuando se logra un resultado correcto se puede corregir la perspectiva de la imagen del foco. Para ello sirven los dos pulsadores de la parte inferior del menú “*Cargar imagen sin corregir*” y “*Corregir imagen*”. Con el primero se carga y se muestra la imagen que se quiere procesar y el segundo devuelve la imagen corregida y lista para procesar, que se mostrará en el panel frontal en la pestaña “*Imagen del foco*”. En la figura de abajo se puede ver el panel frontal en el que se carga la malla y la imagen que se quiere corregir.

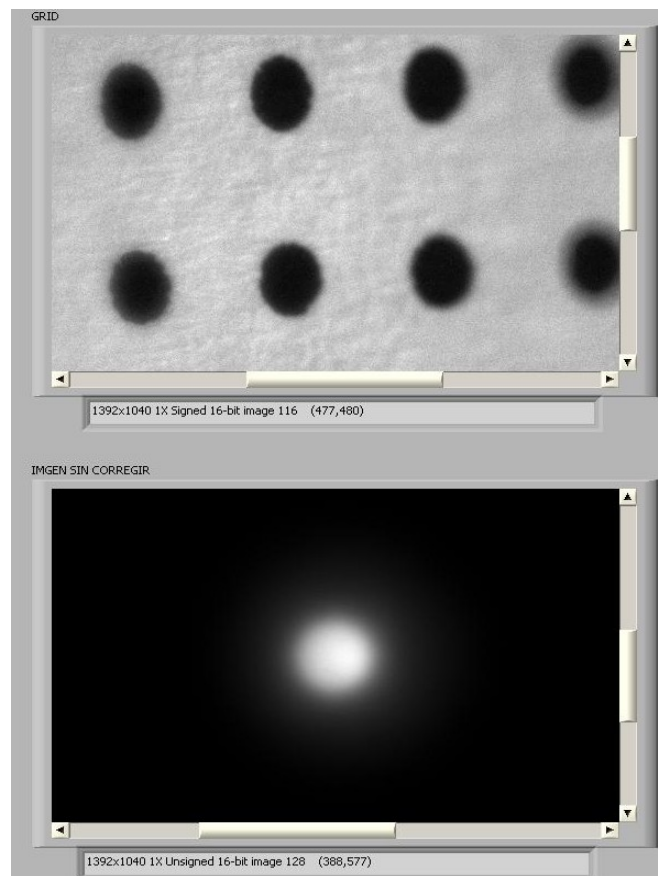


Figura 5.9 – Imagen del grid y del foco que debe ser corregida

La corrección es posible si las dos imágenes han sido tomadas desde la misma perspectiva en un mismo montaje, por lo tanto las imágenes deben tener la misma resolución

5.2.6 Salvar datos imagen

Este apartado del programa se encarga de guardar los datos de cada pixel de la imagen en un archivo para almacenarlo o procesarlo con otra aplicación. Guarda los datos de la imagen como un array de dos dimensiones en el que cada posición del array tiene el valor del pixel en ese punto. El archivo salida se puede generar de dos formas, en un archivo *word* en el que la separación entre elementos del array se hace por medio de la tabulación y el paso de una fila a otra con retorno de carro; o en un archivo de tipo

excel con el que es más fácil de trabajar. Los controles de este menú se pueden ver en la figura de abajo, son dos uno para cada acción que hemos explicado antes.

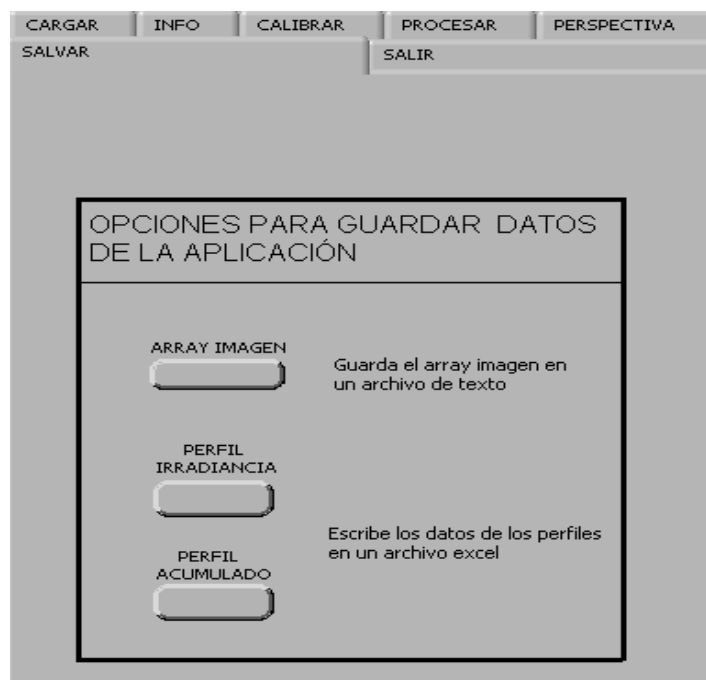


Figura 5.10 – Panel frontal del menú "Salvar Datos"

5.2.7 Procesado de la imagen del foco

El procesado de la imagen del foco obtiene los perfiles de intensidad e intensidad acumulada, y este es el objetivo final de la aplicación que se sirve de las acciones anteriores para completarla. En la imagen de a continuación se puede ver el menú del procesado con los pulsadores para realizar diferentes acciones y en la parte inferior se encuentran las opciones del ruido de fondo. Cuando se pulsa en el menú "*Procesar*" se debe haber realizado la calibración y marcado los parámetros en la imagen, ya que si alguno de estas acciones no se ha realizado no se podrá continuar con el procesado.

Se puede efectuar el procesado con el ruido de fondo calculado por la aplicación o introducirlo manualmente. Para introducirlo manualmente se dispone de una casilla para el valor y un pulsador para elegir una de las dos opciones. En la imagen siguiente se pueden ver las opciones y los controles de este menú.

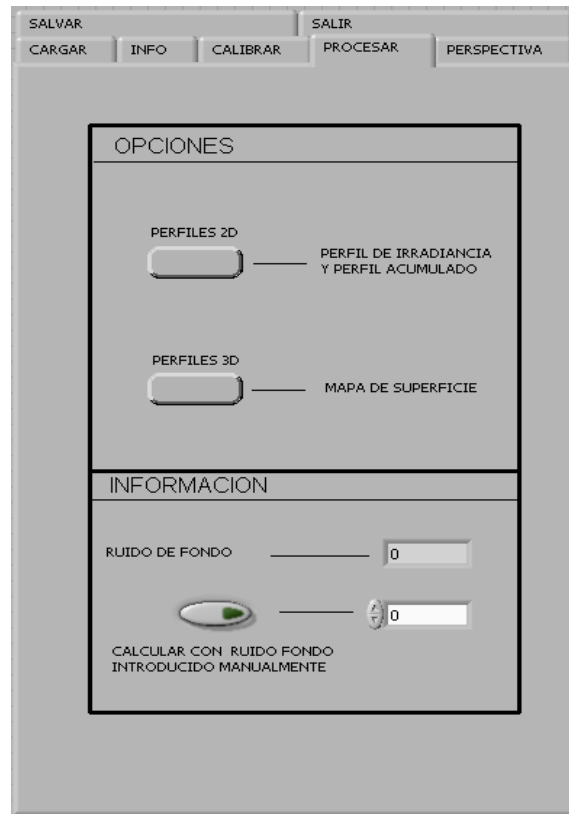


Figura 5.11 – Panel frontal del menú “procesar”

Los resultados que se obtienen al pulsar “*Perfiles 2D*” son el perfil lineal y el perfil lineal acumulado, cuyas representaciones pertenecientes a un concentrador de foco puntual se pueden ver a continuación. Una vez que se han visualizado los perfiles se pueden guardar los resultados para tratarlos con otra aplicación o representarlos fuera de este programa. Para ello se dispone de los pulsadores “*Guardar intensidad*” y “*Guardar intensidad acumulada*”, que abren un documento de *excel* con los resultados de un perfil u otro. Estos resultados en *excel* consisten en un array de 2D con las distancias al centro y sus valores, y una representación gráfica similar a la que se obtiene en la aplicación.

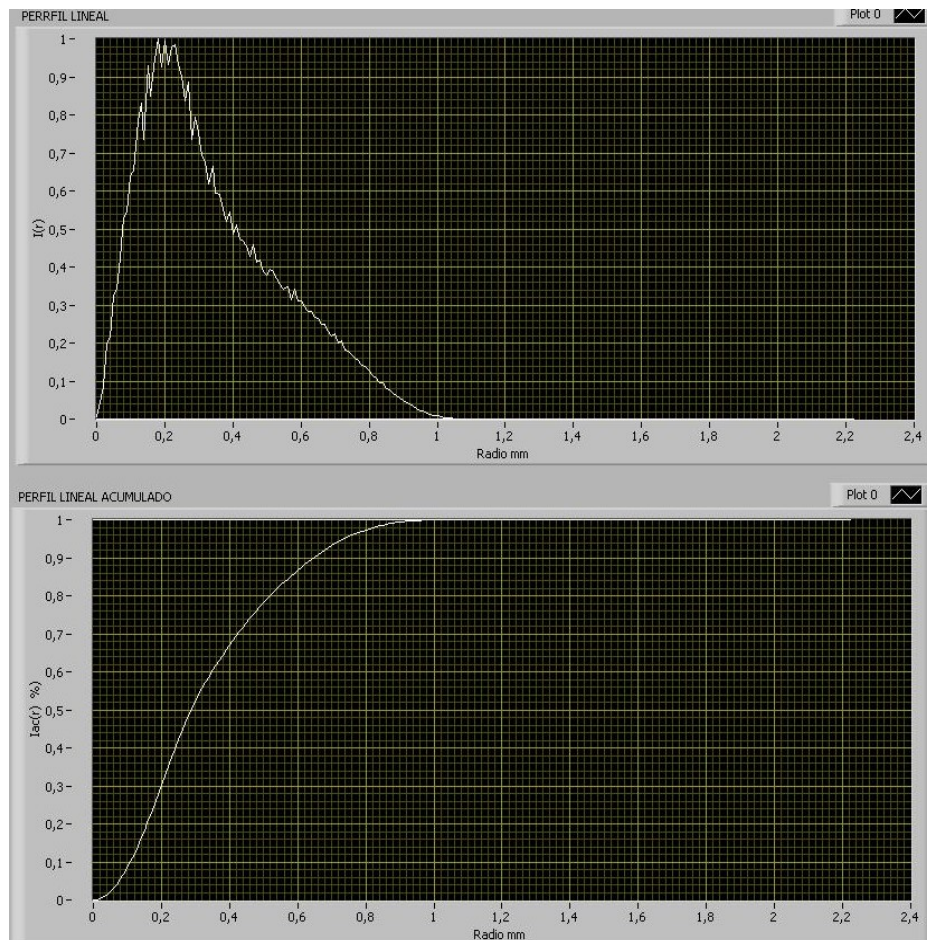


Figura 5.12 – Ejemplo de resultados del perfil de intensidad y perfil acumulado

También obtiene el perfil de la imagen en 3D que es una representación en tres dimensiones interpolada, donde cada índice del array imagen tiene un valor y es este valor el que representa la tercera dimensión. Se puede ver un ejemplo en la figura siguiente en el que se ha representado una imagen de un concentrador lineal; en realidad son dos representaciones, una la imagen completa y otra la correspondiente a el área útil que se ha seleccionado.

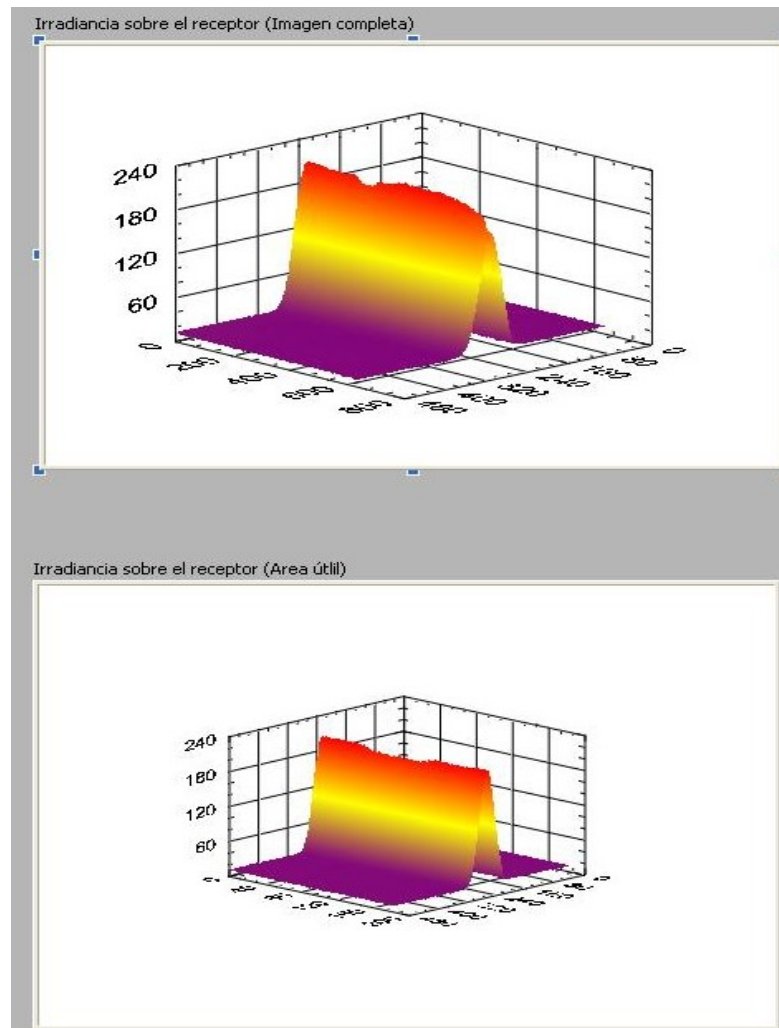


Figura 5.13 – Mapa de superficie del foco de un concentrador lineal

5.2.8 Salir de la aplicación

Se encarga de parar la aplicación y consiste en un pulsador con la opción “Salir” que al pulsarlo pide una confirmación de que se quiere abandonar la aplicación. Una vez confirmado se cierra la aplicación.

6. Ejemplos de montajes prácticos

En este apartado se utilizará la aplicación para procesar imágenes pertenecientes a distintos montajes. Todos los montajes son reales y son proyectos que se han llevado a cabo bien en un laboratorio con una fuente de luz artificial o al aire libre con radiación solar. Se van a analizar tres montajes, un concentrador lineal y otros dos de foco puntual. El montaje de concentrador lineal pertenece a la generación de concentradores EUCLIDES, que llevan desarrollando este proyecto desde mediados de los 90. Los concentradores con simetría de rotación que vamos a analizar son un montaje en laboratorio como el explicado en el apartado correspondiente y otro proyecto en el que el colector se encuentra al aire libre, el receptor en un sitio cerrado y la luz concentrada se transmite de un bloque a otro mediante fibras ópticas.

Explicaremos detenidamente cada uno de los montajes y realizaremos el procesamiento de las imágenes tomadas pertenecientes a cada uno de ellos. Una vez que se obtengan los perfiles sacaremos las conclusiones que nos aporten estos datos y compararemos unos casos con otros.

6.1 Concentrador EUCLIDES

6.1.1 Introducción

El concentrador EUCLIDES es un sistema basado en un espejo parabólico con un seguimiento del sol alrededor de un eje orientado de norte a sur. El sistema fue concebido en la mitad de la década de los 90 sobre dos pilares fundamentales. En primer lugar los conocimientos y la amplia experiencia con concentradores lineales térmicos, como los desarrollados en los 80 en California, sugirieron la posibilidad de aplicar la idea a la concentración fotovoltaica. Por supuesto fue necesario un nuevo diseño del sistema para cumplir los requisitos impuestos para un sistema fotovoltaico.

El segundo pilar fue la aparición en el mercado fotovoltaico de células *BGLG* (Buried Grid Laser Groove). En 1995 esta tecnología demostró su idoneidad para producir células en línea de producción convencional a concentraciones de 1 sol siendo capaces de trabajar por debajo de 3W/cm² al 18% de eficiencia.

Un prototipo fue diseñado e instalado en Madrid con el objetivo de la experimentación de este concepto. La estructura tenía 24 metros de longitud y constaba de 40 espejos para proyectar la luz sobre módulos lineales encapsulados, hechos de 12 células solares de concentración 33x. Las primeras series de módulos de concentración

fueron instaladas y testeadas en diciembre de 1995. Se logró una eficiencia del 14,4% para unas condiciones de funcionamiento determinadas ($T = 25$ C $B = 800\text{W/m}^2$), incluyendo el desajuste óptico.

Los buenos resultados obtenidos por el prototipo hicieron que en Tenerife se montara una planta basada en la tecnología EUCLIDES con una potencia de 480 Kw. Esto ha sido un importante paso en el desarrollo de la tecnología de concentración en el sentido de iniciar y promover la participación industrial.

6.1.2 Descripción del sistema

A pesar de que el diseño de este concentrador ha sufrido numerosos cambios y evoluciones, el concepto global ha cambiado muy poco. Una imagen de la estructura de este sistema puede verse en la figura siguiente. Podemos enumerar las partes en las que se divide:

1. Para concentrar la luz se han utilizado dos alas de espejo parabólico dispuestas simétricamente a ambos lados del eje del sistema.
2. La estructura sobre la que se monta es de acero y se extiende a lo largo de un eje orientado de norte a sur. El sistema tiene tres anclajes, dos fijos en los extremos y uno en el centro que es el que se encarga de mover el sistema y realizar el seguimiento del sol durante el día de este a oeste, por lo tanto efectúa un seguimiento en un solo eje.
3. El receptor consiste en células tipo LGBC (laser-grooved buried contact) para concentraciones de 30 soles con diodos encapsulados. Estas células se encuentran montadas sobre un disipador de calor de aluminio que sirve también de fijación del receptor sobre la estructura. El receptor incluye una segunda etapa de reflexión que aumenta la transmisión angular del sistema, lo que aumenta el ángulo de aceptación.

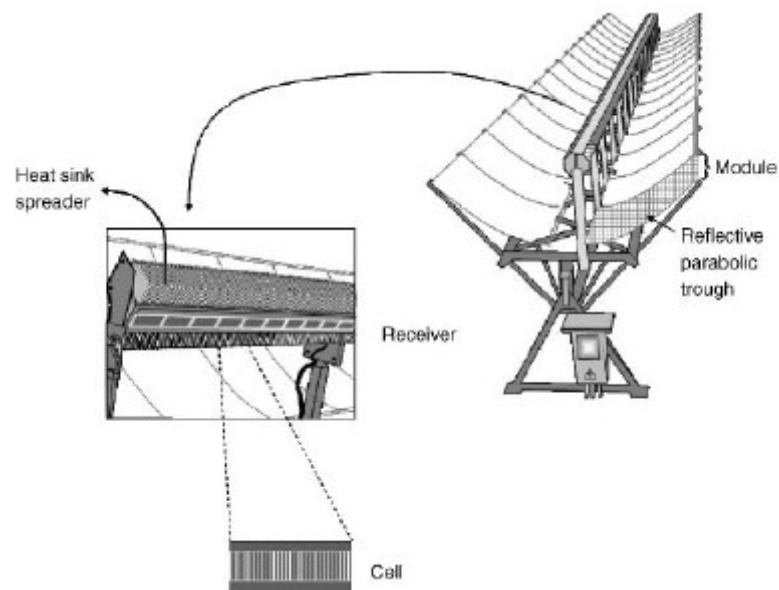


Figura 6.1 – Concentrador EUCLIDES. Concentrador lineal con seguimiento en un eje

6.1.3 Tecnología de los espejos

Al principio la intención fue fabricar los espejos EUCLIDES con vidrio plateado porque la experiencia con concentradores térmicos ha demostrado buenos resultados y fiabilidad a largo plazo. Sin embargo, para su uso en aplicaciones fotovoltaicas se necesita una calidad óptica mayor y una distancia focal menor debido a su diseño óptico y mecánico.

Por lo tanto, se utilizó una nueva tecnología basada en capas reflectantes para fabricar el prototipo. Consiste básicamente en una laminación de material reflectante, y si fuera necesario una cubierta protectora montada sobre una lámina de aluminio. La lámina se dobla utilizando un molde parabólico y el perfil se fija con traviesas y vigas. El éxito de esta tecnología se basa en el hecho de que la forma final del espejo depende únicamente del molde y no de la exactitud del perfil del nervio, mientras que la geometría de la superficie especular depende únicamente del material reflectante, el adhesivo y la superficie de la lámina, y no del acabado de la superficie obtenido con el molde.

El rendimiento de los espejos fabricados para el prototipo fue impresionantemente bueno, con eficiencias ópticas del 90% para concentraciones de 32X. La película reflectante utilizada elegida fue la comercial 3M EPC-305. Este material se fabrica por

evaporación de plata y cobre en una lámina acrílica, por lo que no es necesaria otra protección ambiental adicional en la cara exterior pero si requiere el sellado de bordes con acrílico para evitar la entrada de agua. Este material dejó de ser fabricado por 3M lo que obligó a la búsqueda de materiales alternativos. Como ninguna de las opciones disponibles en aquel momento ofrecía las características que el EPC-305 en cuanto a reflectividad y protección medioambiental se optó por otras soluciones diferentes como las que se describen a continuación.

Una de ellas consiste en un espejo de aluminio pulido conformado por el procedimiento anterior, utilizando como material reflectante láminas de aluminio de 500 *um* de espesor. La calidad del espejo se obtiene por pulido mecánico y abrillantado electroquímico, que proporciona valores de reflectividad entorno al 80%. Sin embargo nada más instalarse se observó una rápida degradación que no pudo ser frenada como se pretendida con una capa de barniz. Otra solución fue incorporar al espejo de aluminio una película de plata evaporada, aunque se comprobó que la vida útil de éste insuficiente.

Actualmente hay algunas opciones disponibles que ofrecen buenos rendimientos y protección medioambiental, y además son las dos opciones que vamos a analizar. La más parecida al espejo tradicional laminado consiste en la utilización de films reflectantes dieléctricos multi-capa, carentes de metal y que no sufren de corrosión. Destaca la gama de Visual Mirror de 3M, en concreto el VM2002. La reflectividad del material es superior al 95 %, obtenida a partir de capas dieléctricas de diferentes índices de refracción. Está disponible con adhesivo, aunque de momento sólo para aplicaciones de interior, por lo que es necesario protegerlo con otro film acrílico transparente.

La otra opción en la que se ha avanzado de forma considerable es la de espejos de cristal. Si bien en un principio fueron descartados ante la imposibilidad de encontrar quién los fabricara con la precisión óptica necesaria, en los últimos tiempos hemos conseguido algunas pruebas con resultados prometedores fruto del trabajo conjunto con INDUGLAS, una empresa del sector del vidrio.

6.1.4 Receptor

La piedra angular del receptor EUCLIDES son las células *LGBC* (laser-grooved buried-contact) producidas en las instalaciones de BP Solar en Madrid. Esta tecnología es particularmente adecuada para la producción de células de concentración efectuando muy pocos cambios. Con esta tecnología pueden ser fabricadas células rentables capaces de trabajar por encima de 10W/cm², pudiendo llegar a una eficiencia del 18% para concentraciones de 40 soles.

Los parámetros relacionados con la metalización y la malla tienen una influencia muy significativa en el rendimiento de las células y deben ser optimizados cuidadosamente. La profundidad de los surcos, la separación entre ellos y el grosor de las láminas de metal han sido estudiadas con detalle con el propósito de encontrar las condiciones de procesamiento que optimice la eficiencia de la célula. A continuación podemos ver un dibujo en el que se puede ver la estructura de una célula LGBC.

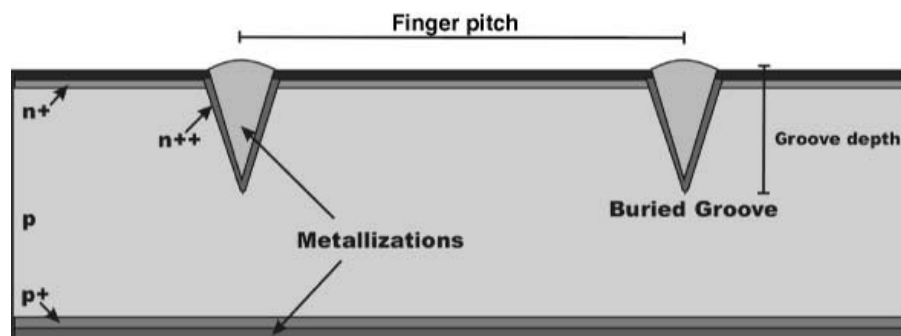


Figura 6.2 – Sección transversal de una célula EUCLIDES con contactos enterrados

La base del módulo consiste en una lámina de aluminio sobre la que van montadas las células. Las conexiones de las células, los cables y los diodos de paso completan el módulo del receptor, el cual es recubierto con un material de encapsulado transparente. El módulo es pegado térmicamente al disipador de calor, el cual también proporciona los soportes en los que colgar el receptor a la estructura. Dos etapas reflectivas secundarias se fijan en la parte delantera del módulo, que evitan que la radiación concentrada directa incida sobre las soldaduras y amplían la transmisión angular del sistema. Por último un material que proporciona la transferencia de calor suficiente se coloca entre las células y los módulos. A continuación podemos ver una imagen del receptor EUCLIDES completo en el que se incluye la segunda etapa de concentración y el disipador de calor de aluminio.

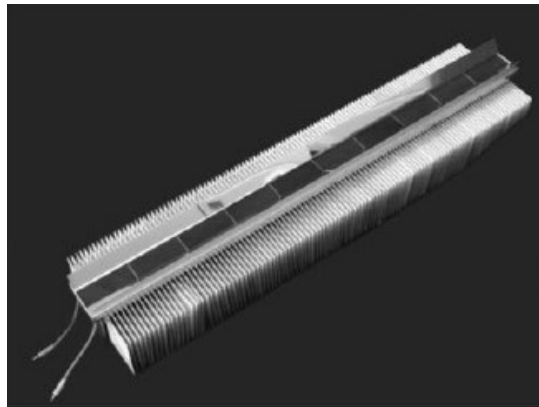


Figura 6.3 – Receptor EUCLIDES completo con una segunda etapa y con disipador de aluminio

6.1.5 Estructura del seguidor

El sistema fue pensado para que tuviera una longitud de entre 70 y 90 metros para minimizar el peso y con ello el coste del sistema. Sólo hay tres soportes por estructura, para reducir los costes de montaje y preparación para el suelo. En consecuencia, la estructura fue diseñada para una extensión entre 35 y 45 metros sin sufrir una deformación importante, de acuerdo con el ángulo de aceptación limitado del sistema óptico. El ángulo de aceptación del reflector primario es alrededor de 1° ; por tanto, se deben evitar desajustes mayores a $0,5^\circ$ a lo largo de toda la estructura para asegurar que todos los módulos son iluminados correctamente.

El sistema de control de seguimiento EUCLIDES es capaz de compensar cualquier fuente de desajuste que afecte al conjunto, como la inclinación de la tierra, desviación del eje Norte-Sur, error de posición cenital, etc.

Por otra parte, los desajustes causados por la relación entre los desplazamientos angulares de los colectores y los receptores, provenientes del peso o de la fuerza del viento, son muy críticas. Por tanto la estructura debe cumplir estrictamente los requisitos de rigidez a torsión y flexión, de manera que toda la línea siga estando alineada dentro de un estrecho rango angular. A pesar de su rigidez, la estructura es muy ligera, alrededor de 145 kg/m incluyendo los soportes.

La estructura, que está hecha de acero, solo tiene tres soportes: el mecanismo de movimiento en el centro, y dos soportes en los extremos. El mecanismo central, como puede verse en la imagen siguiente, consiste en una rueda que convierte la potencia para

un movimiento lineal y suave de una barra deslizante por medio de un par de cables de acero.



Figura 6.4 – Mecanismo central del sistema de seguimiento EUCLIDES.

6.1.6 Análisis casos prácticos

Vamos a analizar dos casos diferentes dependiendo de la tecnología que se ha utilizado para fabricar los espejos. Como se ha explicado, últimamente se están utilizando tanto espejos de vidrio como films reflectantes multicapa. Nuestro objetivo será evaluar la calidad de los espejos fabricados con una y otra tecnología por medio de las imágenes tomadas por la cámara CCD.

Las dos tecnologías que vamos a analizar son las mencionadas en un apartado anterior. Una es la gama *Visual Mirror* de 3M que es la más parecida al espejo tradicional laminado y consiste en un film reflectante dieléctrico multicapa, carente de metal, que no sufren corrosión y con una reflectividad del 95%. La otra tecnología es la fabricación de espejos de cristal con una buena calidad óptica, lo que logramos mediante el trabajo conjunto con *INDUGLAS* una empresa del sector del vidrio. A continuación compararemos los resultados obtenidos en uno y otro caso.

VISUAL MIRROR 3M

En la figura siguiente se muestran dos imágenes capturadas por la cámara CCD. Una de la línea del foco de luz concentrada cuando se ha utilizado en el colector el film reflectante Visual Mirror, y a su lado una imagen de los ejes sobre el receptor.

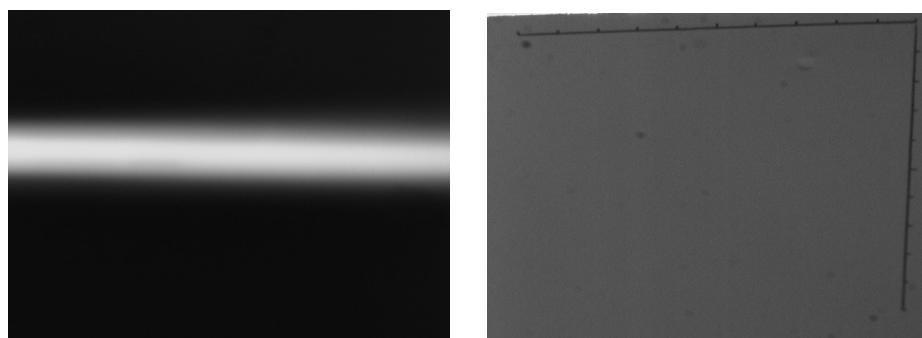


Figura 6.5 – Foco de luz y ejes de coordenadas del sistema utilizando la película reflectante Visual Mirror

Estos son los perfiles obtenidos con el colector fabricado mediante laminado reflectante de la gama 3M. Podemos ver que la línea del foco no es uniforme transversalmente en la representación del perfil de intensidad que se corresponde con la gráfica de arriba. En este perfil se observa que partiendo del máximo, que se localiza en el centro, la intensidad decrece uniformemente a ambos lados del centro. El ancho del foco con mayor intensidad tiene algo más de 2cm.

El perfil acumulado se muestra en la gráfica de abajo y sirve para determinar la energía colectada en función del tamaño del colector. Como los colectores que queremos caracterizar son lineales se expresa en función de la anchura del mismo. Del análisis se desprende que para este colector un receptor de 4mm recoge el 95% de la energía proveniente del espejo.

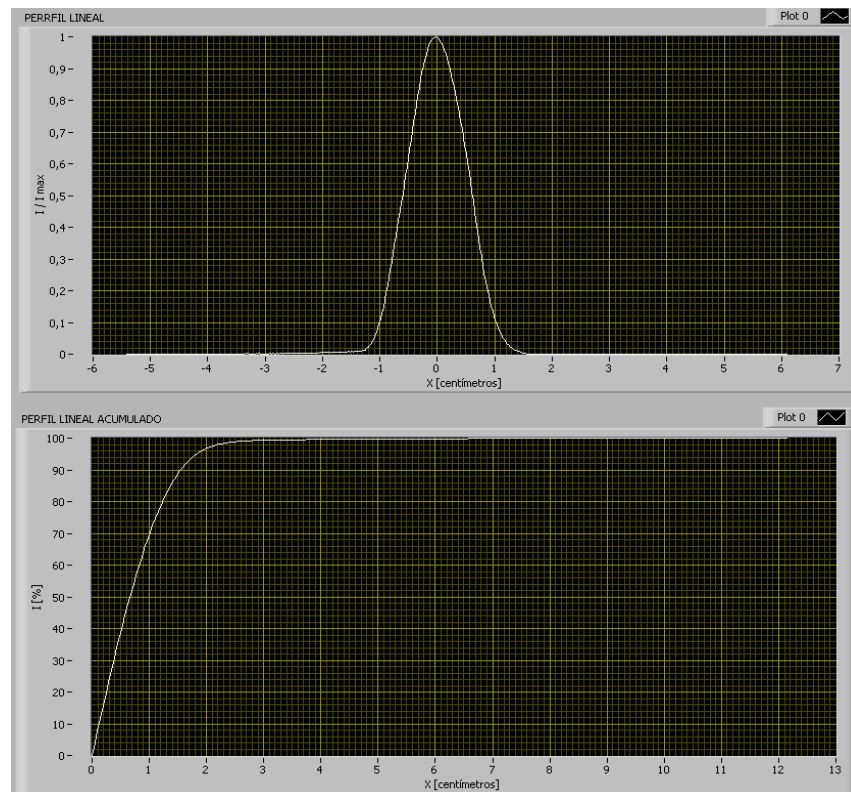


Figura 6.6 – Perfil de irradiancia y perfil acumulado de un concentrador EUCLIDES (Visual Mirror)

ESPEJO CRISTAL (INDUGLÁS)

El foco de luz cuando se utiliza el colector fabricado en cristal por INDUGLÁS se muestra en la imagen de a continuación. En ella se puede ver la falta de uniformidad a lo largo del foco.

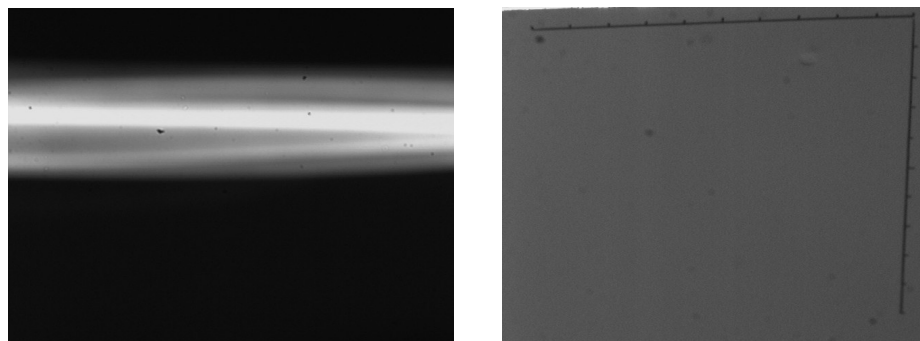


Figura 6.7 – Foco de luz y ejes de coordenadas del sistema utilizando un espejo de cristal (INDUGLÁS)

Los resultados obtenidos con los espejos de cristal son algo diferentes. La línea del foco es bastante irregular como se aprecia en el perfil de intensidad, en el que podemos ver varios máximos relativos y es algo más ancha que en el caso anterior. Ambos espejos (laminado reflectante y de cristal) entregan el 95% de la energía en un receptor de 4cm de ancho. Sin embargo, el ancho del foco que se obtiene con el espejo de cristal es mayor y más irregular por lo que sería necesaria una segunda etapa para proporcionarle mayor ángulo de aceptación.

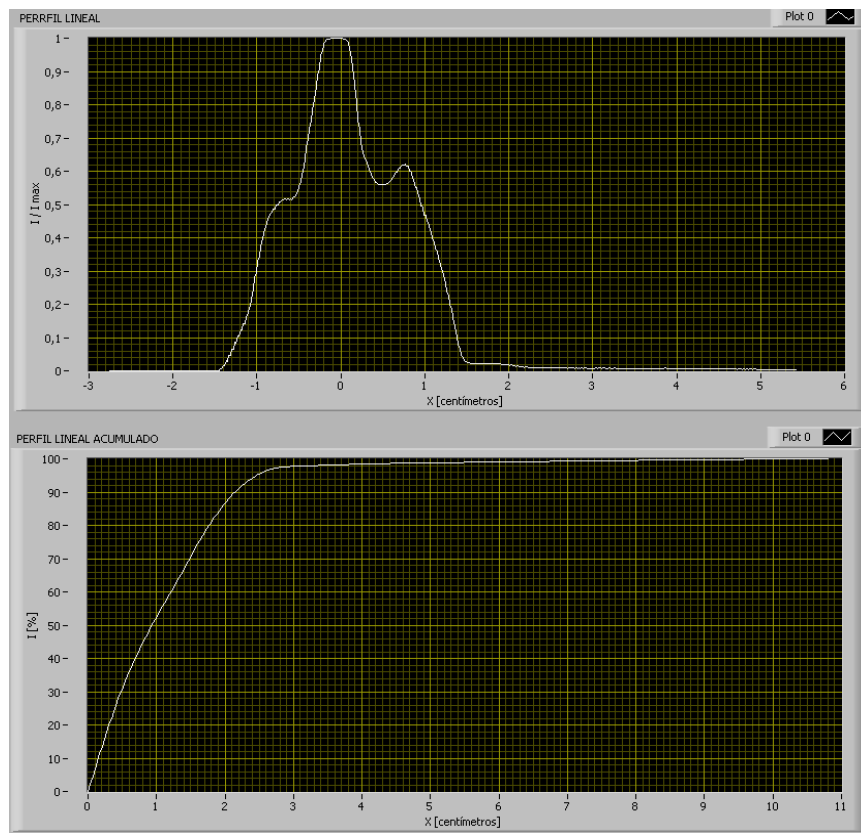


Figura 6.8 – Perfil de irradiancia y perfil acumulado de un concentrador EUCLIDES (Espejo cristal INDUGLÁS)

6.2 Montaje con lente esférica

6.2.1 Montaje en banco óptico

Para llevar a cabo la caracterización de este tipo de lentes se ha llevado a cabo un montaje en de laboratorio en un banco óptico y utilizando una fuente de luz es artificial y un divisor de rayos para separar el haz de luz en dos.

Las lentes convencionales que se usan en sistemas de imagen tienen forma esférica, lo que produce cierto tipo de aberraciones. Por el contrario, para aplicaciones fotovoltaicas se usan lentes esféricas, que concentran el haz de luz incidente en el foco.

Para captar la imagen del foco de luz mediante la cámara CCD se utiliza un divisor de rayos (beam splitter). Es un instrumento óptico que divide un rayo de luz en dos, su forma más común es un cubo compuesto por dos prismas de vidrio triangulares que están pegados por la base usando resina. El grosor de la capa de resina es ajustado para que la mitad de la luz incidente en una cara del cubo sea transmitida y la otra mitad sea reflejada perpendicularmente a la dirección de propagación. De esta manera podemos poner la cámara perpendicular al reflector lambertiano y captar la mitad de la luz reflejada que proviene de éste. Así, aunque no se capta toda la luz reflejada si que se tiene una medida relativa. Además no hay que corregir la perspectiva, lo que hubiera ocurrido en el caso de haber tomado la imagen directamente y formando un ángulo con el receptor.

Podemos diferenciar dos montajes dependiendo de la posición en la que pongamos el divisor de luz. En el montaje que se muestra a continuación colocamos el divisor antes de concentrar la luz por medio de la lente.

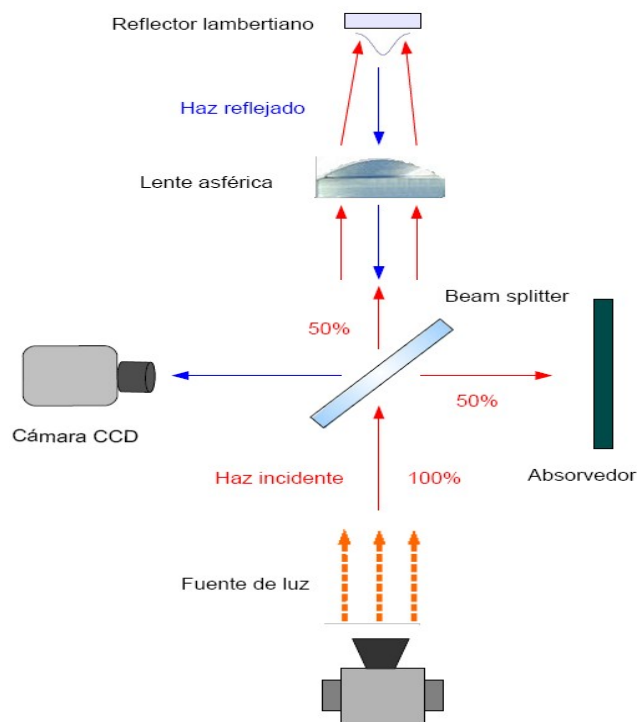


Figura 6.9 – Montaje en laboratorio con divisor de luz antes de la lente

Se observa que al dividir el haz de luz, una mitad se propaga hasta la lente pero otra se refleja perpendicularmente en dirección contraria al lugar donde se encuentra la cámara CCD. Para evitar que esta fracción del haz de luz pueda distorsionar la imagen tomada por la cámara se coloca un material que absorba toda la radiación y de esta manera no se refleje de vuelta hacia la cámara. El haz de luz reflejado vuelve a pasar por el divisor y la luz que éste refleja perpendicularmente es la que captamos con la cámara CCD. A continuación se puede ver en la imagen siguiente el otro montaje, que se diferencia del anterior en que el divisor de rayos se sitúa entre la lente esférica y el reflector lambertiano. Este segundo montaje es preferible siempre que sea posible, porque la captura de la imagen del foco no se produce a través de la lente esférica, que puede deformar la imagen. Sin embargo, con lentes de distancia focal corta, en algunos casos no hay espacio suficiente para disponer el *beam splitter* entre la lente y el receptor, por lo que es necesario usar el montaje primero.

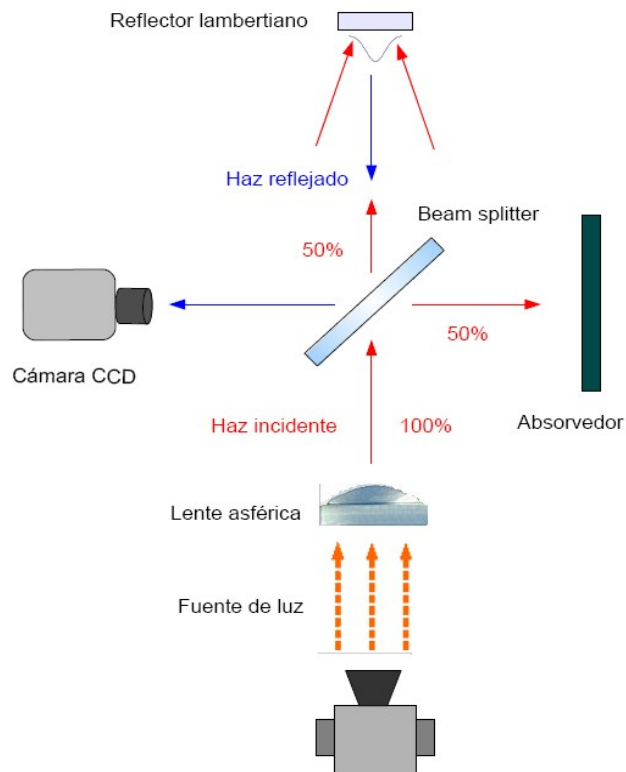


Figura 6.10 – Montaje en laboratorio con divisor de luz después de la lente

6.2.2 Análisis caso práctico

Las imágenes que se muestran a continuación pertenecen a un montaje en el laboratorio con lente esférica. A la izquierda el foco resultante y a la derecha la malla que nos servirá como ejes para calibrar el sistema.

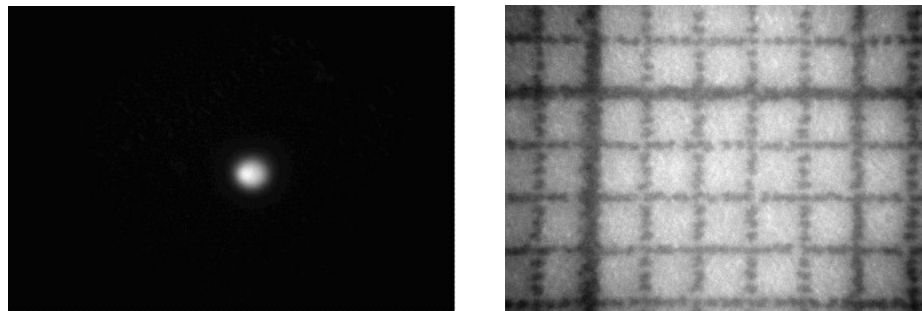


Figura 6.11 – Foco de luz y ejes de coordenadas del foco del concentrador con simetría de rotación

La uniformidad en el foco que se ve en la imagen de arriba puede verse en el perfil de irradiancia promedio. El perfil acumulado nos da información del tamaño que debe tener el receptor para que recoja toda la energía que está entregando el colector, en este caso haría falta un receptor de 0,5 milímetros.

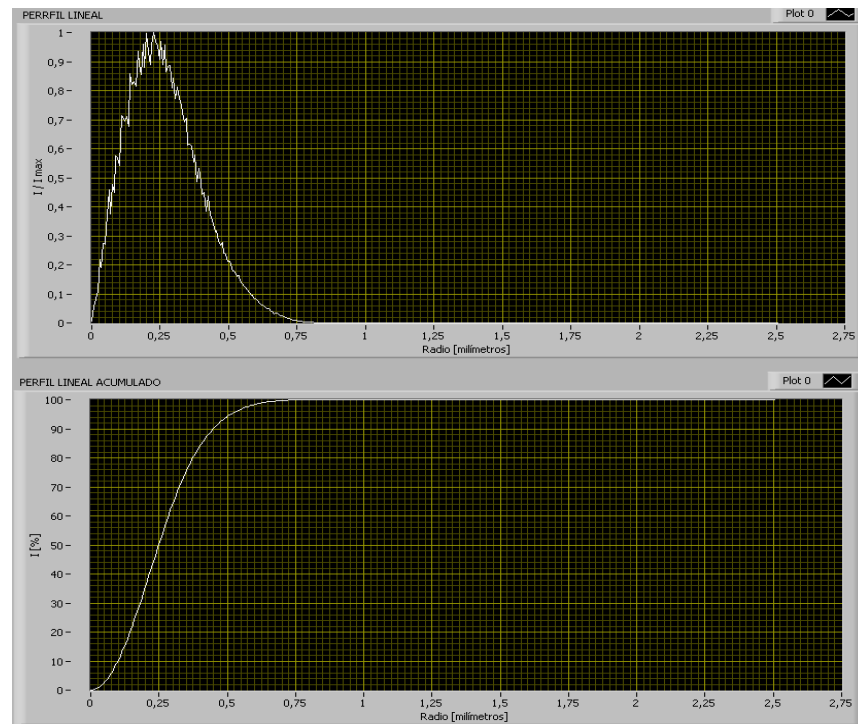


Figura 6.12 – Irradiancia promedio y perfil acumulado del concentrador con simetría de rotación

6.3 Montaje con transmisión mediante fibra

6.3.1 Introducción

El proyecto PV-Fibre ofrece un planteamiento muy novedoso que se resume en el desarrollo de un receptor de células equipado con dispositivos fotovoltaicos III-V de multiunión (MJ) diseñados para alta concentración, que pudieran ser adaptados a grandes concentradores convencionales de bajo coste y cuyo diseño fuese lo más independiente posible del concentrador. Las células multiunión presentan una muy alta eficiencia y se utilizan con éxito desde hace tiempo en aplicaciones espaciales. Por otra parte, han demostrado una previsión de costes capaz de alcanzar 1 €/Wp en operación a una concentración de 1.000X pero su capacidad de operar por largo tiempo a la intemperie sometidas a tan alto nivel de concentración no había sido probada aún en el momento de abordar este proyecto.

La idea central es la instalación del receptor, la parte más delicada y problemática de un sistema de concentración, en interior, sin restricciones de tamaño derivadas del diseño de la óptica del concentrador, evitando problemas de disipación de calor, proporcionando un ambiente seco y permitiendo una conexión serie-paralelo inteligente que evite pérdidas por desajuste eléctrico; en resumen: separando las cuestiones inherentes al receptor de células de aquellas asociadas al colector solar.

El sistema consiste en un disco parabólico montado en un seguidor solar de dos ejes que enfoca la luz en un receptor transparente que, a su vez, distribuye la luz a un haz de fibras ópticas conectadas cada una de ellas a una célula fotovoltaica multiunión. Dichas células están montadas en una placa de conexión que al mismo tiempo ejerce la función de disipador de calor, y que podemos llamar genéricamente “*receptor de células*”.

Usando la tecnología actual de material III-V, las células solares MJ pueden operar con una eficiencia superior al 28% para una concentración de 1000 soles a baja temperatura.

Sin embargo el desarrollo de concentradores específicos para tales dispositivos no es trivial, y depende de muchos factores. La uniformidad de la luz a través de la célula, la uniformidad del flujo entre células, el acoplamiento de la luz a los semiconductores, las conexiones, la disipación térmica y la protección exterior pueden reducir la eficiencia del sistema y su expectativa de vida al 70%. Estos inconvenientes pueden retrasar la aplicación de los resultados del laboratorio, principalmente en Europa donde los sistemas de concentración han sido menos desarrollados.

6.3.2 Descripción del sistema

El concepto general de la óptica en el proyecto *PV-fibre* se muestra en la figura siguiente. El colector es una óptica Cassegrain que consiste en una gran superficie parabólica y un espejo secundario que enfoca el rayo en un receptor transparente localizado a lo largo del eje de la parábola que funciona con una reflexión interna total. Hay un haz de fibras ópticas conectadas al receptor que son las encargadas de transportar la luz concentrada hasta las células que se encuentran en el interior, que permanecen aisladas y protegidas contra el polvo, erosión y agentes externos y perfectamente centradas en el haz de luz. Este receptor ha sido diseñado para proporcionar uniformidad y para distribuir la luz entre las fibras lo más equitativamente posible

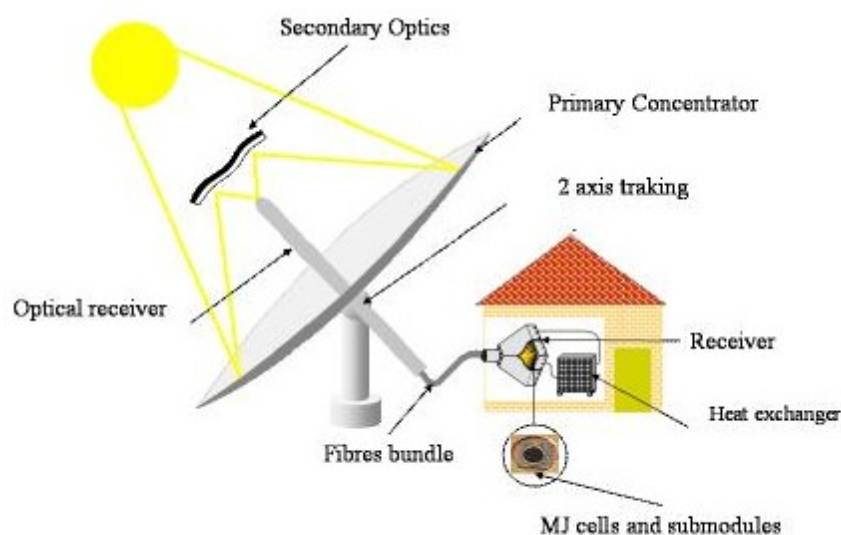


Figura 6.13 – Descripción general del sistema

6.3.3 Sistema óptico

El sistema óptico es una combinación de dos espejos, un primario cóncavo y un secundario convexo, alineados ambos en el mismo eje óptico y enfrentados el uno al otro. El primario dispone de un orificio en el centro, permitiendo así que la luz alcance cualquier tipo de receptor óptico. El espejo primario es de tipo parabólico y el secundario hiperbólico. En la óptica tradicional formadora de imagen este diseño permite aumentar el tamaño y la intensidad luminosa de los objetos enfocados, por lo que es usado habitualmente para la fabricación de telescopios astronómicos. Esta

configuración resulta igualmente válida para concentrar energía luminosa, con la ventaja de que en este caso no es necesario un grado de acabado en los espejos tan perfecto como se exige para formar imágenes, lo que permite explorar procedimientos de fabricación más simples.

En este sentido los discos parabólicos son buenos candidatos y son capaces de proporcionar altas concentraciones geométricas. Dados los buenos resultados alcanzados con las primeras aproximaciones y la economía de fabricación de los paraboloides estos se fueron consolidando como principal alternativa.

Fabricación de los reflectores

Para la fabricación del colector primario parabólico se requiere un proceso de moldeado en el que el material es trabajado para darle la forma adecuada. Posteriormente la superficie es pulida para hacerla especular y finalmente es tratada para que sea reflectiva.

En el proceso de moldeado se utiliza un molde macho de acero pulido sobre el que se construyen los discos en un compuesto de fibra de vidrio reforzado con poliéster. La superficie interna del disco se recubre con una capa reflectante que además es selectiva y resulta transparente para la radiación infrarroja, inútil para las células, permitiendo filtrarla y evitar el calentamiento de las mismas. Con este objetivo se fabricaron los discos coloreando el material de fibra de vidrio en negro, opción que nos permitía este procedimiento de fabricación. De esta forma conseguimos que la radiación infrarroja que atraviesa la lámina reflectante sea absorbida por el cuerpo del paraboloide y no se transmita al resto del sistema. El metalizado de la superficie interna se realiza mediante un film reflectante que puede ser el “Visual Mirror” de 3M o mediante laminado de aluminio.

El reflector secundario debe soportar altos niveles de concentración y también debe tener una reflectividad óptima para evitar pérdidas. Se fabrica un hiperboloide en duraluminio (aleación con gran resistencia) y se trata de aumentar su reflectividad al máximo. Para ello se realiza una serie de pulidos para metales disminuyendo progresivamente el tamaño del grano, para acabar con una solución de óxido de cerio como acabado final. Adicionalmente, se les aplicó una capa de plata de 0,2 μm de espesor seguida de una capa protectora de óxido de silicio para evitar la corrosión de la plata, ambas por evaporación al vacío. Dicha capa de plata aumenta la reflectividad hasta un valor de 93% frente al 80% del aluminio.

6.3.4 Receptor óptico y haz de fibras

La distribución no uniforme de la irradiancia del foco generado por las dos etapas de colectores debe ser corregida antes de que la luz incida sobre el haz de fibras. Como cada fibra debe llevar la misma cantidad de luz, es necesario mezclar la luz entre la entrada y la salida del dispositivo llamado receptor óptico. La mejor solución para conseguir un haz de luz uniforme consiste en utilizar un caleidoscopio de cuarzo como receptor el cual permite una división homogénea de la luz entre las fibras, junto al receptor de salida. .

La fabricación del paquete de fibras es uno de los puntos críticos porque las fibras son circulares y debe garantizarse que no habrá espacios entre ellas durante la fabricación. *CeramOptec* ha desarrollado un procedimiento para crear fibras con una estructura hexagonal compacta y fundir el conjunto de fibras al receptor. En la imagen siguiente se muestra el manojo de fibras y el receptor óptico unidos mediante un soporte.



Figura 6.14 – Receptor del sistema con las células y sus correspondientes fibras ópticas

6.3.5 Módulo receptor de células

Uno de los objetivos de este proyecto es fabricar más de 400 células solares *dual-junction* para funcionar a 1000 soles. El desarrollo de la estructura donde se colocan las células ha sido hecho con un reactor MOVPE (Metal Organic Vapour Phase Epitaxy) de tamaño industrial para permitir una fácil adaptación al proceso industrial. El reactor

MOVPE es un aparato que sirve para depositar el material semiconductor por crecimiento epitaxial en fase de vapor. Uno de estos reactores de tamaño industrial con capacidad para fabricar obleas de 24x2 o 8x4 pulgadas ha sido utilizada para fabricar las células.

El receptor es diseñado para sujetar, conectar las células y disipar activamente el calor de las células. Las células son depositadas y conectadas en un sustrato aislante de cerámica, que componen un sub-módulo de 24 células en grupos de 3 series de 8 células en paralelo y protegido con diodos de paso. En la imagen siguiente en la parte izquierda podemos ver uno de estos sub-módulos.

Una vez que todos estos sub-módulos han sido unidos son colocados en un disipador de calor, que sirve también de soporte mecánico para la estructura y que podemos ver en la imagen de la derecha.

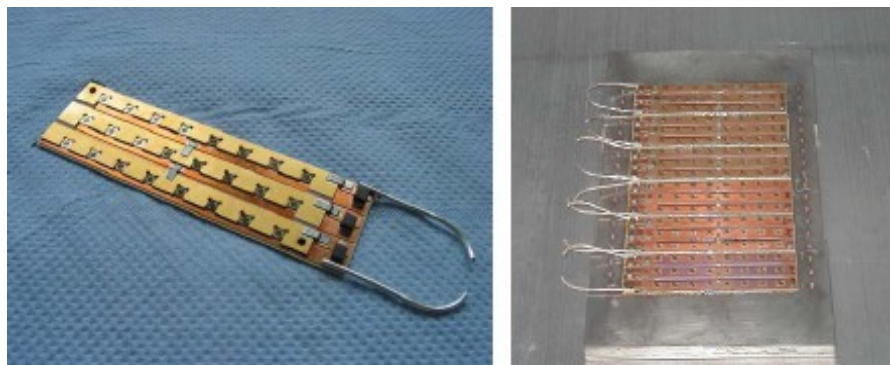


Figura 6.15 – Módulo del receptor con 24 células y sus diodos de paso

Las fibras individuales se unen en un paquete tan grueso como el receptor óptico y al otro extremo se conectan a cada célula con adhesivo óptico transparente. Aunque la intensidad de la luz es ya uniforme a la salida de la barra del receptor, se presta la atención a las pérdidas por desajuste. Las 144 células de cada matriz son conectadas en módulos de 24 células cada uno, conectadas en primer lugar en paralelo de 8 en 8 y posteriormente las 3 ramas en serie. Los módulos a su vez se conectan en serie con el fin de llegar a una tensión de cerca de 36 voltios.

El acoplamiento de las fibras ópticas a las células se ha logrado por medio de una silicona transparente. La alineación precisa entre cada celda y su fibra se da por medio de puentes, que también proporcionan una función mecánica. Este método proporciona una alineación de las fibras con las celdas de una precisión de $\pm 0,1\text{mm}$.

6.3.6 Sistema de seguimiento

El sistema de seguimiento consiste en una cabina prefabricada montada encima de una plataforma circular, con un eje motorizado construido sobre un único pilar central y que podemos ver en la imagen. Esta plataforma giratoria permite el seguimiento de acimut de la cabina, que se refiere al ángulo que forma ésta con el eje Norte-Sur, medido desde el Norte en sentido de las agujas del reloj y que nos permite seguir el Sol de Este a Oeste.



Figura 6.16 – Caseta prefabricada con el sistema montado y seguimiento de dos ejes

En el techo de la cabina hay una estructura diseñada para sujetar tres espejos parabólicos con su segunda etapa Cassegrain, junto con la varilla de acoplamiento de luz que se introduce en el interior de la cabina mediante una abertura en el techo. Esta estructura está montada sobre el eje horizontal de la cabina y gira alrededor de éste, proporcionando así la elevación cuando es empujado por el actuador lineal, de tal manera que la ranura se cierra por medio de fuelles flexibles y permite al receptor permanecer siempre en el interior cualquiera que sea la orientación. La cabina tiene un sistema de control de seguimiento electrónico y unos sensores de posición para generar la señal para atacar el actuador y generar el movimiento.

6.3.7 Análisis casos prácticos

Los dos casos que se van a analizar a continuación se diferencian en los materiales que se han utilizado para fabricarlos. Ambos han sido fabricados mediante un molde macho de acero pulido, pero cada uno utiliza un recubrimiento reflectante distinto. Los dos materiales reflectantes que se han utilizado en estos casos son una capa de recubrimiento basado en el aluminio y el film Visual Mirror que es un dieléctrico multicapa carente de metal y que no sufre corrosión.

FILM ALUMINIO

En la imagen siguiente se puede ver el foco de luz que se consigue con este tipo de concentrador y al lado la imagen de los ejes que se utiliza para calibrar el sistema.

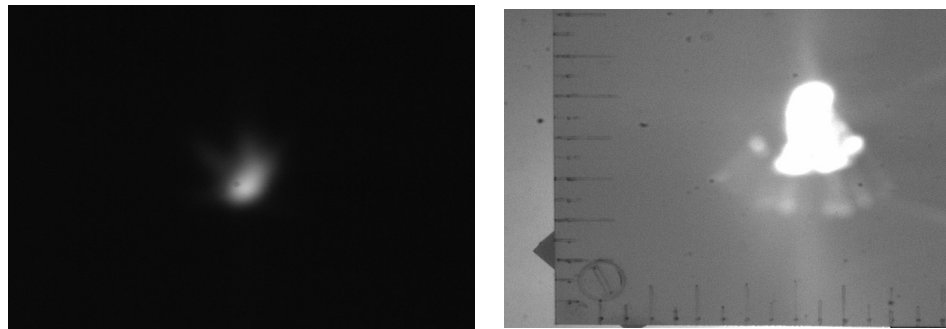


Figura 6.17 – Foco de luz y ejes de coordenadas del sistema con el colector recubierto de película reflectante de aluminio

En la imagen del foco se aprecia la falta de uniformidad de éste, que en el perfil de intensidad se puede ver como picos en la función. De este perfil también se obtiene el tamaño del foco, que es 1,5 centímetros. El perfil acumulado nos da información de la energía que entrega el colector, en este caso haría falta un receptor de 1 centímetro para recolectar el 95% de la energía.

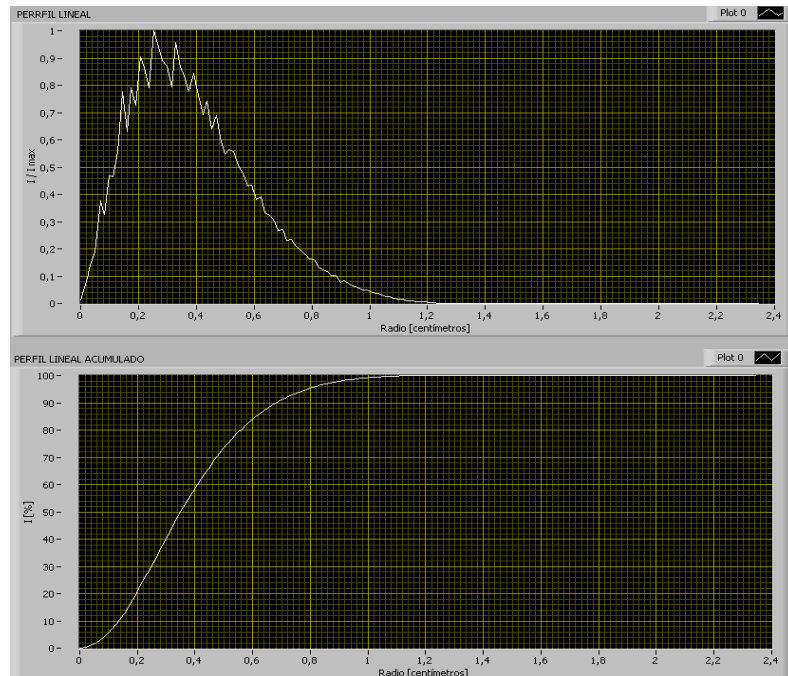


Figura 6.18 – Irradiancia promedio y perfil acumulado del colector con película de aluminio

VISUAL MIRROR

Éstas son las imágenes del foco de luz concentrada cuando se utiliza un colector con el film reflectante Visual Mirror y los ejes que se han utilizado para su calibración.

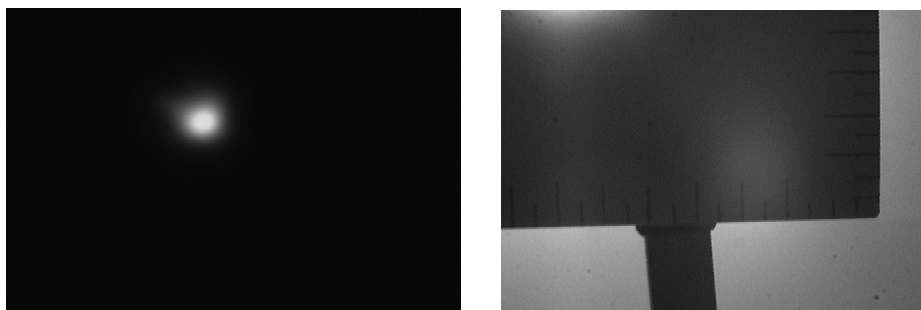


Figura 6.19 – Foco de luz y ejes de coordenadas del sistema con el colector recubierto de película reflectante Visual Mirror

El foco es más uniforme que en el caso anterior, y al serlo el ancho es algo menor, alrededor de 1,2 cms. La curva del perfil acumulado tiene una mayor pendiente que en el caso de film de aluminio y colecta el 95% de la energía en un receptor de algo menos de 1 cm.

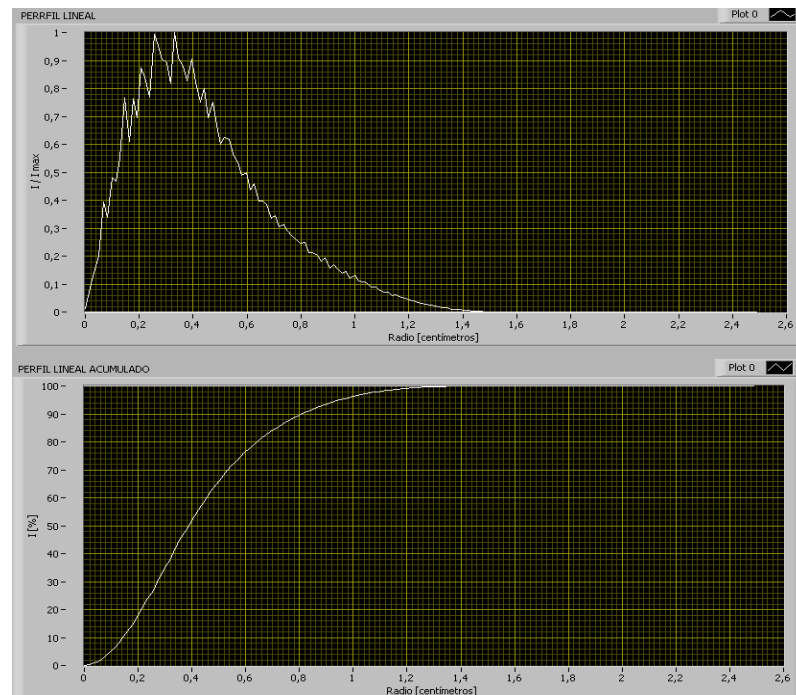


Figura 6.20 – Irradiancia promedio y perfil acumulado del colector con film Visual Mirror

Bibliografía

[1] <http://en.wikipedia.org/wiki/Etendue>

[2] I. Antón, D. Pachón, G. Sala. “*Characterization of Optical Collectors for Concentration Photovoltaic Applications*”. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol.11, 2003.

[3] Ignacio Antón. *Métodos y equipos para la caracterización de sistemas de concentración fotovoltaica*, Tesis doctoral 2004.

Anexo A. Descripción código de aplicación.

A continuación se realiza una descripción más detallada de cada una de las funciones principales de la aplicación, ya que son complejas y en alguna de ellas es necesario realizar más de una acción. Estas acciones a realizar se explican con un mensaje por pantalla cuando se pulsa en el menú cualquiera de estas principales funciones.

Para la programación de estas funciones se utiliza una *estructura de eventos* como se ha explicado anteriormente, es decir, que el programa está en reposo mientras que no ocurra algo que se haya definido en el programa. En esta estructura de eventos se definen todas las acciones necesarias para realizar cada una de las funciones principales. La estructura debe estar dentro de un bucle *while* para que el programa pueda registrar los diferentes eventos que se produzcan. En la figura siguiente se puede observar la estructura general de la aplicación, se observa que los eventos registrados en la estructura son muchos más que las funciones principales. Esto es debido a que cada función puede necesitar varias acciones para completar su cometido, ejecutándose estas acciones de forma secuencial de manera que algunas de ellas no se podrán realizar si antes no se han realizado todas las anteriores.

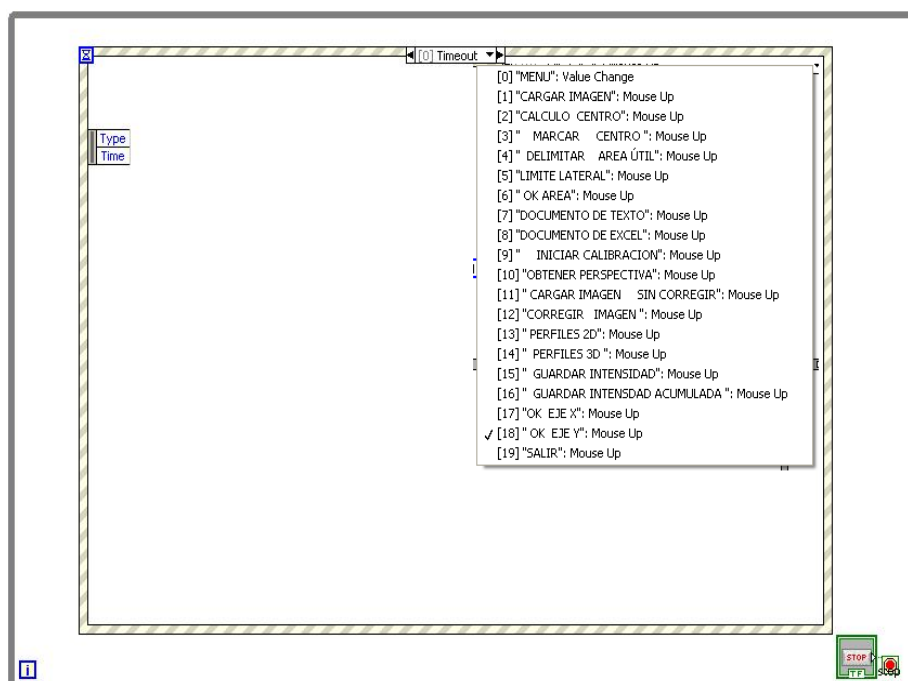


Figura A.1 – Estructura general de eventos de la aplicación

A.1 Cargar imagen foco

La secuencia de acciones que se deben ejecutar para cargar la imagen del foco que queremos procesar, para posteriormente obtener con ello los perfiles, es la que se muestra a continuación en el diagrama de flujo.

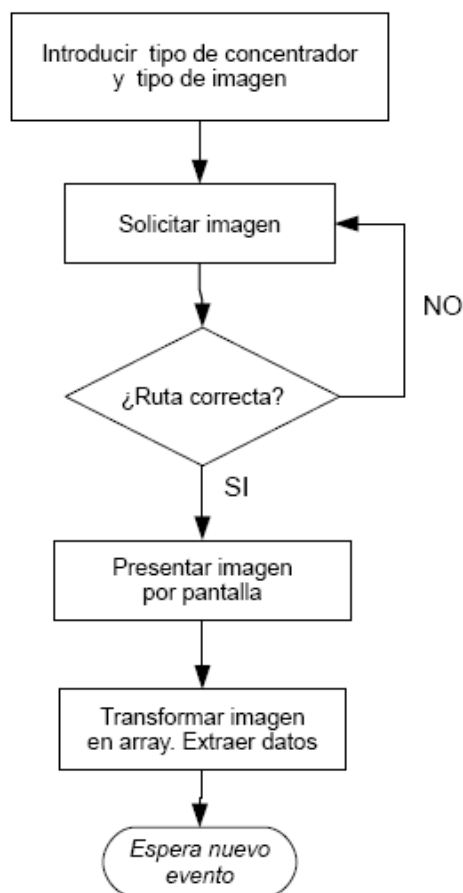


Figura A.2 – Diagrama de flujo de la acción cargar imagen para procesar

Lo primero que se hace para cargar la imagen es introducir el tipo de imagen y el tipo de concentrador al que pertenece dicha imagen. El tipo de imagen es necesario para que el VI encargado de crear la imagen y reservar espacio en memoria pueda trabajar con ella. El tipo de concentrador al que pertenece la imagen es necesario para saber como se debe procesar, ya que difiere el método para obtener los perfiles y el modo de presentarlos.

Una vez que hemos seleccionado tanto el tipo de imagen como de concentrador podemos proceder a cargar la imagen, para lo cual la aplicación nos pide que especifiquemos la ruta donde está el archivo imagen. Este archivo debe ser un archivo imagen válido, si la ruta que hemos especificado no es correcta entonces nos pide de nuevo la ruta. Si el archivo y la ruta son correctos entonces lee el archivo y presenta la imagen por pantalla.

Cuando se ha cargado y mostrado, se transforma la imagen en un array para poder ser procesada. El array resultante es una matriz de dimensiones iguales a la resolución de la imagen, en la que el valor de cada posición será el valor del pixel correspondiente. A continuación se obtiene el valor máximo y mínimo del array imagen, y con el valor máximo se calcula el umbral multiplicándolo por 0.5. Este umbral es el que, como se ha explicado en el desarrollo matemático, se utiliza para localizar los píxel que están por encima de ese valor y así calcular el centro del foco. Se extrae el número de filas y columnas para, además de mostrar la información por pantalla, poder recorrer el array para procesarlo.

Para realizar esta función solo se necesita una acción registrada como evento, que corresponde con la pulsación del botón “*Cargar imagen*” del panel frontal. En la figura de a continuación puede ver la programación correspondiente a cargar una imagen.

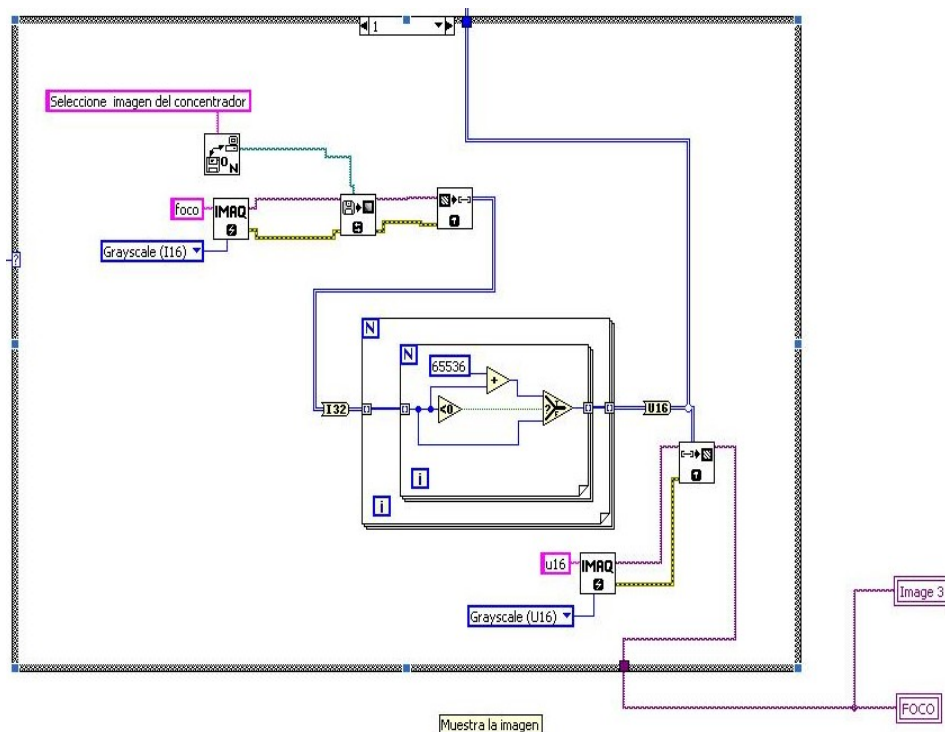


Figura A.3 – Cargar imagen de un archivo, convertir valores y presentar por pantalla

Este es uno de los casos en el que la imagen es de 16 bits. Lo primero es reservar espacio de memoria mediante el VI **“IMAQ Create”**, después solicita la ruta donde se encuentra la imagen y esos parámetros se pasan al VI **“IMAQ ReadFile”** que es el que se encarga de abrir la imagen. Se transforma la imagen en un array y se somete a un proceso para cambiar enteros con signo (desde -32768 a 32767) a enteros sin signo (0 a 65535). El array resultante es el que se va a procesar y se vuelve a transformar en imagen para mostrarla por pantalla, tanto en la imagen principal **“Foco”** como en la imagen reducida superior **“Image 3”**

En la siguiente figura se puede ver como se realiza la otra parte de la función perteneciente al mismo evento. Se extrae el valor de las dimensiones del array y los valores máximo, mínimo y umbral.

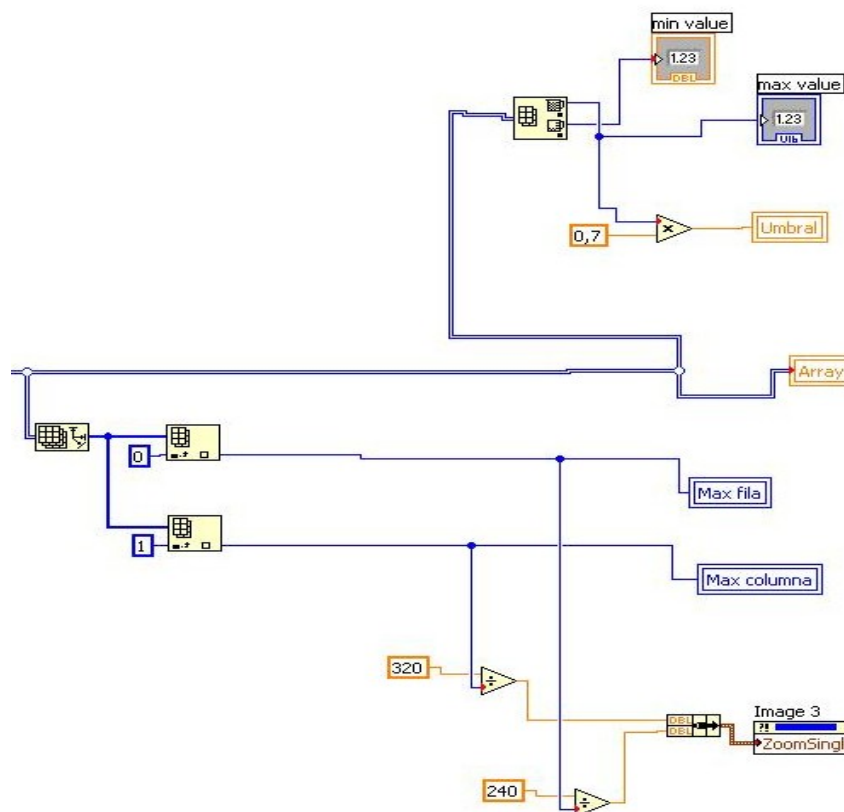


Figura A.4 – Hallar valores de la imagen y mostrar en escala en pantalla

En la parte inferior de la figura se realiza el escalado de la imagen principal del foco, para que se muestre durante toda la ejecución del programa en la imagen superior, que tiene un tamaño menor. Para ello se utiliza un VI **“Property node”** referido a la **“Image 3”**, que sirve para fijar un factor de ampliación obtenido mediante la relación entre sus dimensiones. Con esto se logra que la imagen se muestre entera para un tamaño menor que el propio de la imagen.

Por último, se inicializan algunas variables para controlar la ejecución del programa y determinar los procesos que se deben ejecutar a continuación y cuales no están permitidos. Se selecciona la herramienta para manipular la imagen con un **“Property node”**, que en este caso será el cursor.

A.2 Calibrar el sistema

La calibración del sistema es necesaria para obtener los perfiles y presentarlos en unidades reales, así que se debe realizar una vez por lo menos para analizar cada montaje. Es necesario que el usuario tome algunas decisiones mientras se está realizando, por eso está dividido en varias acciones registradas en el programa como eventos. Estas acciones son: cargar la imagen que servirá para la calibración, marcar en ella una distancia e introducir su equivalente en unidades del mundo real.

El diagrama de flujo de la secuencia de acciones que se deben realizar para hallar la equivalencia entre distancias en píxel de la imagen y unidades reales, se muestra en la figura de a continuación.

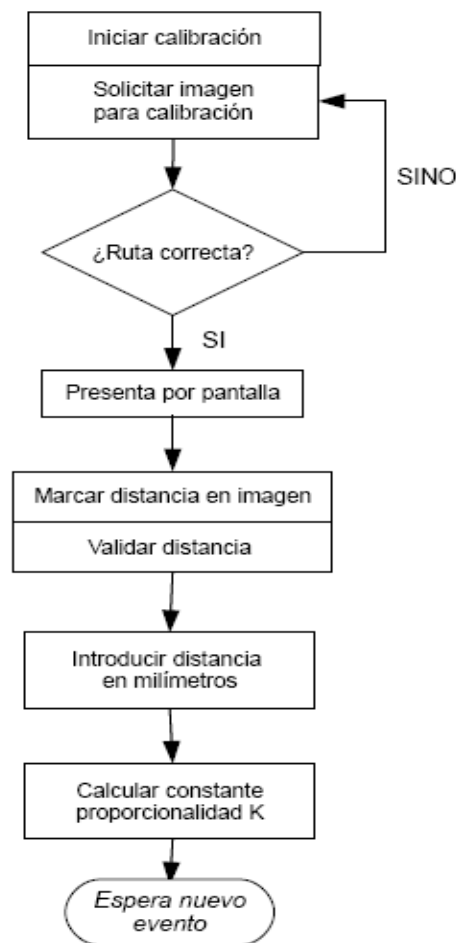


Figura A.5 – Diagrama de flujo de la calibración del sistema

La programación de esta función consta de dos eventos diferentes en la estructura general del programa. Estos son ***“Iniciar calibración”*** y ***“OK calibración”***, que se ejecutan al presionar los pulsadores con esos nombres. El evento “Iniciar calibración” servirá para cargar la imagen que utilizaremos para la obtención de la constante de proporcionalidad. El procedimiento es el mismo que para el caso anterior, solo que una vez cargada la imagen y presentada por pantalla, se fija la herramienta para dibujar líneas.

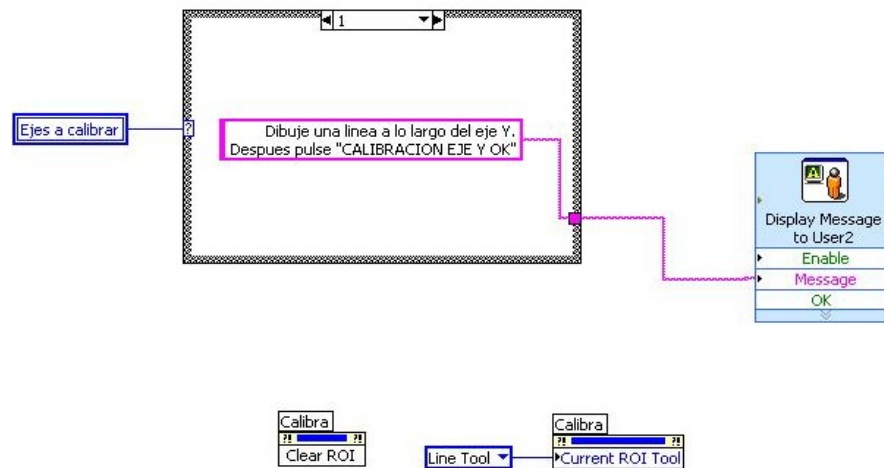


Figura A.6 – Muestra un mensaje por pantalla y selecciona herramienta para manipular imagen

Con la imagen en pantalla y con la herramienta seleccionada, se dibuja una línea en la imagen siguiendo algún eje. Aunque este evento no se ha definido en la estructura principal podemos utilizar los datos que se derivan de él. Cada vez que se produce un evento sobre alguna de las variables del panel frontal éste queda registrado en una cola junto con el elemento al que va asociado.

Una vez dibujada la línea, el pulsador **“OK calibración”** ejecuta una acción registrada como evento. Lo primero que hace es recuperar el evento que nos interesa, resultado de dibujar sobre la imagen. Para ello se utiliza un **“Invoke Node”**, que sirve para solicitar alguna acción con la variable a la que está asociado. En concreto es el VI **“Get Last Event”** que con el parámetro de entrada filtra el tipo de evento que se recupera. Los parámetros de salida son varios pero el que se utiliza es el que nos da el valor de las coordenadas de los extremos de la línea. Posteriormente, con el VI **“IMAQ Point Distances”** se obtiene la distancia en píxel de la recta.

Conocida la distancia en píxel ahora debemos hallar la relación entre estos y unidades reales, para ello pedimos al usuario que introduzca el equivalente en milímetros mediante un mensaje por pantalla. Para obtener la relación se divide la distancia en píxel entre la distancia en milímetros y se halla la constante de proporcionalidad **K**. Por último se inicializan algunas variables para controlar que la calibración haya salido bien y se pueda continuar con la ejecución del programa. En la imagen siguiente se puede ver la programación de este evento, que se ha dividido en varios pasos para que se ejecute de forma secuencial.

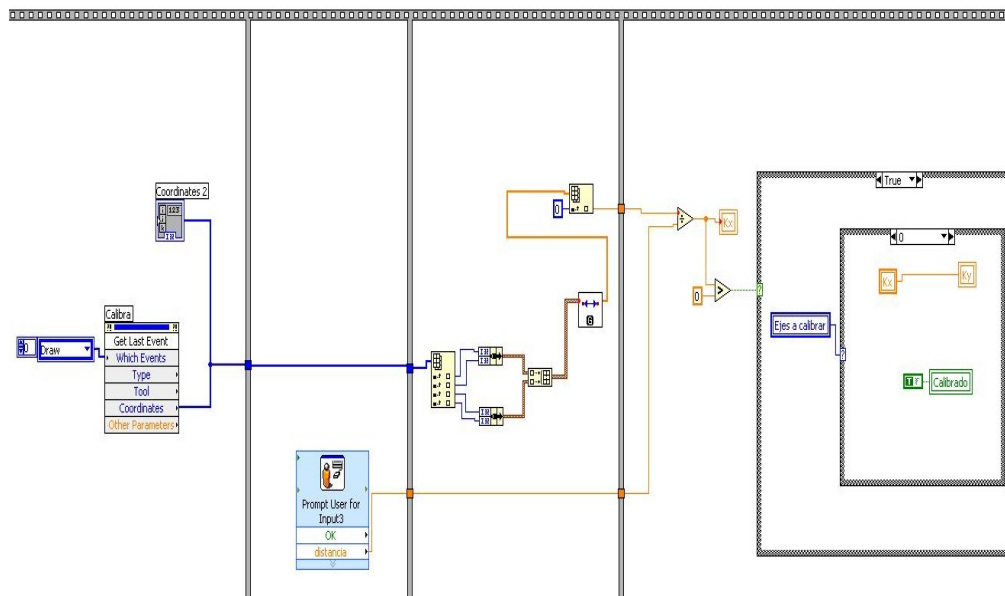


Figura A.7 – Halla distancia de la línea seleccionada en la imagen

A.3 Información de la imagen

En este menú se encuentran los controles para seleccionar parámetros en la imagen (centro del foco y área útil) y los indicadores para mostrar los resultados. Cada pulsador dispara un evento, en concreto son cinco los eventos registrados en la estructura general de la aplicación necesarios para la realización de esta parte del programa. Dos para marcar el centro de la imagen, uno manual y otro automático; y tres para seleccionar el área de la imagen.

El diagrama de flujo se puede ver en la siguiente figura. Lo primero es presentar por pantalla los valores máximo y mínimo, y las dimensiones del array de la imagen.

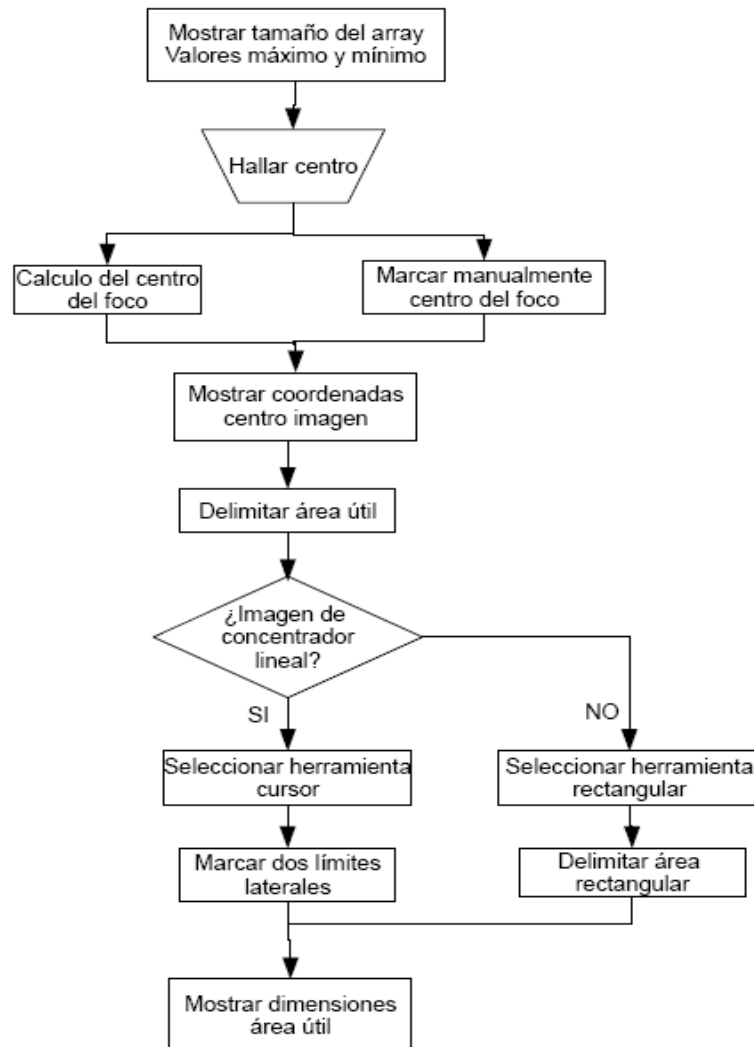


Figura A.8 – Diagrama de flujo de seleccionar parámetros para procesamiento

Las dos formas de seleccionar el centro de la imagen son marcar con el cursor en la imagen un punto, o calcularlo automáticamente. Para cada una de estas formas existe un evento, asociado a los pulsadores **“Cálculo centro”** y **“Marcar centro”**. La programación en ambos eventos varía dependiendo del tipo de concentrador al que pertenezca la imagen, es decir que dentro del evento hay un caso para cada concentrador.

El evento **“Marcar centro”** fija el centro marcado por el usuario, registrando las coordenadas que se han seleccionado en la imagen. Dependiendo del tipo de

concentrador, el centro será un punto si el concentrador es puntual o una línea si el concentrador es lineal. Para diferenciar un caso de otro se utiliza una estructura tipo “Case” siendo la variable que funciona como selector el “tipo de concentrador”. A continuación se puede ver una imagen de la programación de este evento en el caso de un concentrador lineal..

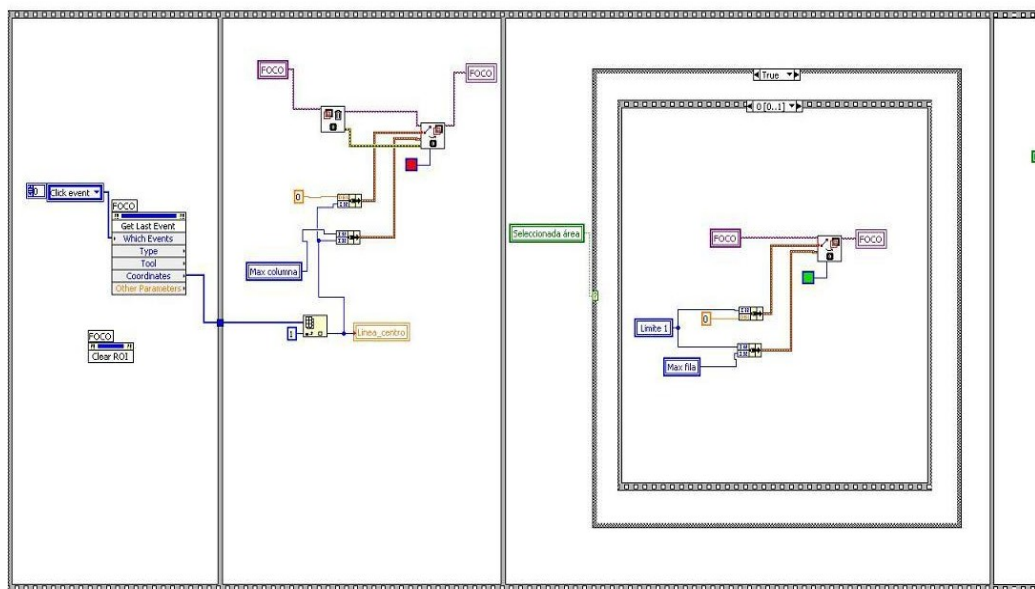


Figura A.9 – Registrar evento sobre la imagen y mostrar el centro de la imagen de un foco lineal

Las coordenadas del punto señalado se recuperan por medio de un “**Get Last Event**” asociado a la imagen del foco. Se dibuja una línea longitudinal o una cruz señalando un punto dependiendo del tipo de concentrador. Para dibujar sobre la imagen se van a utilizar algunos VI’s del módulo *NI Vision* que proporcionan herramientas para dibujar figuras y texto sin destruir la imagen original. Primero se utiliza “**IMAQ Clear Overlay**” para borrar cualquier cosa que hubiera marcado anteriormente en la imagen. Después, con “**IMAQ Line Overlay**” o “**IMAQ Overlay Points**” se marca el centro introduciendo sus coordenadas

A continuación se comprueba si anteriormente el área útil había sido seleccionada, en cuyo caso se debe volver a dibujar. Por último se inicializan algunas variables para controlar la ejecución del programa, indican que el centro ha sido seleccionado y que ha sido manualmente.

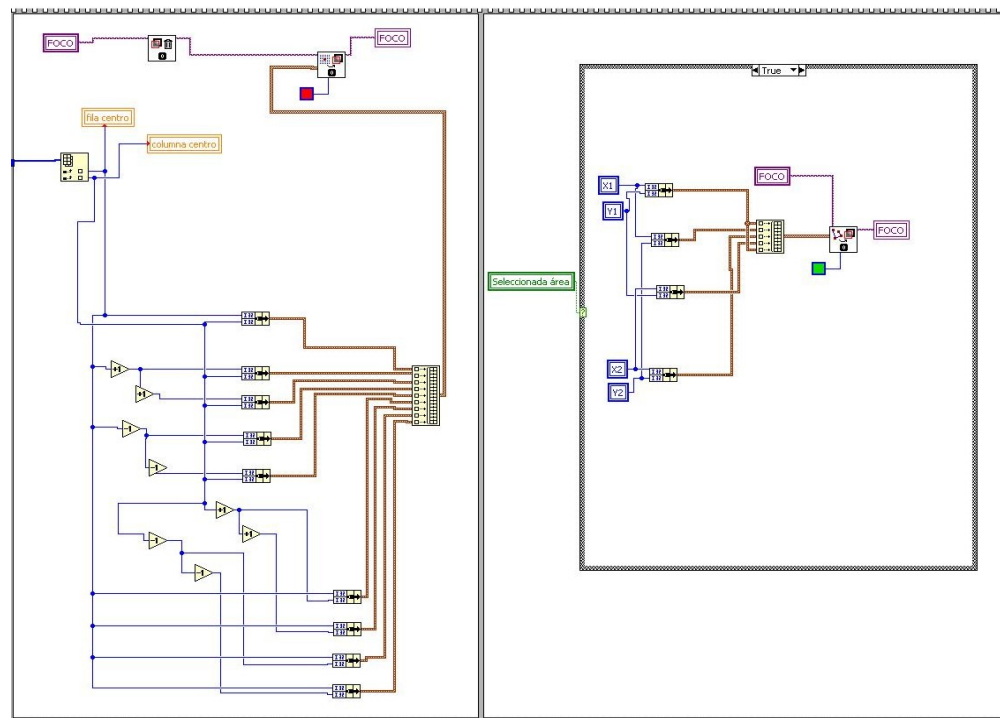


Figura A.10 – Dibuja el centro de la imagen en un foco puntual y de nuevo el área si ha sido seleccionada

En el caso más general, el centro se calcula y se muestra automáticamente. El centro nos informa sobre la zona de la imagen en la que la intensidad lumínica es mayor. Su cálculo es distinto dependiendo, como en el caso anterior, del tipo de concentrador a analizar y también se utiliza una estructura “Case” para distinguirlo. En la imagen siguiente se puede ver la programación de este evento cuando la imagen es de un concentrador lineal.

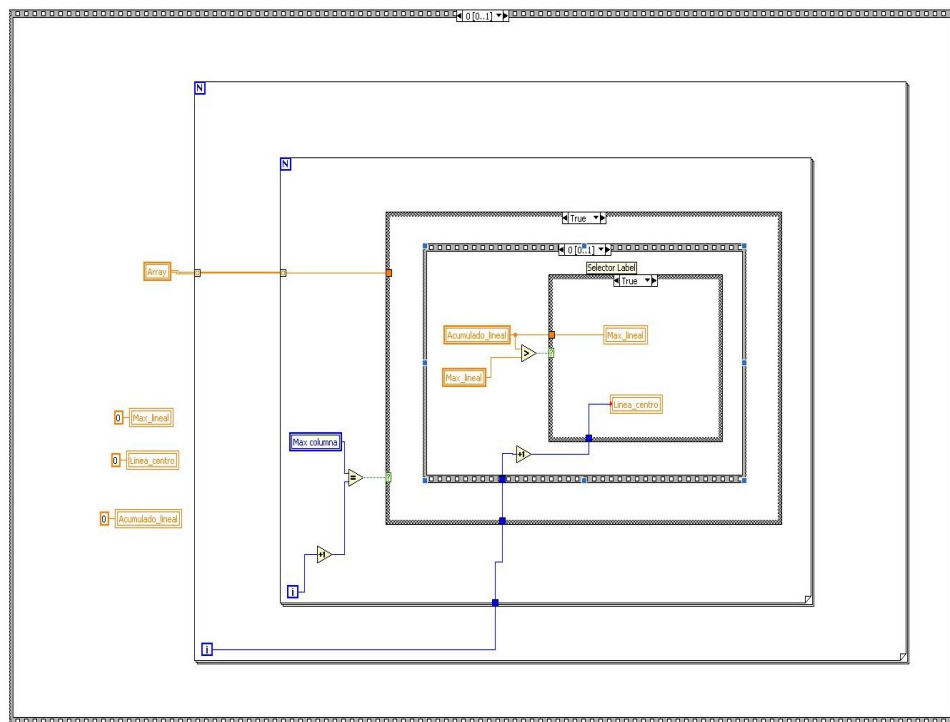


Figura A.11 – Cálculo del centro de la imagen para el foco de un concentrador lineal

En la imagen de un concentrador lineal, el centro es la línea longitudinal al foco con más intensidad. Para hallarla se recorre el array sumando y comparando las intensidades de los pixel de cada fila para obtener la posición de intensidad máxima. El array se recorre utilizando dos bucles *for* anidados con el array como entrada. El bucle de dentro barre los elementos de una fila con cada iteración y el bucle de fuera cambia de fila cada vez que se ejecuta. En el bucle de dentro se suman todos los valores de los elementos de una misma fila, se comparan con el máximo acumulado de otras iteraciones y si es mayor se cambia el valor del máximo y se guarda la posición de la fila. Posteriormente se pinta esta línea sobre la imagen y como en el caso anterior, se comprueba si el área útil había sido seleccionada.

El cálculo del centro de un foco puntual se hace de forma diferente, aunque también indica la zona del foco con más intensidad. Este centro debe ser un punto pero no el punto con más intensidad porque habrá muchos puntos con la misma máxima intensidad. Por lo tanto hallamos todos estos puntos máximos y hallamos la media de las coordenadas x e y , sumando la mayor y menor y dividiendo entre dos.

El array se recorre con dos bucles anidados para encontrar las coordenadas de los puntos con un valor mayor que el del umbral. Estas coordenadas se guardan en otros

dos array, uno guarda la componente x de los puntos y otro la componente del eje y . Cuando se ha recorrido toda la imagen se halla la media con los puntos máximo y mínimo. Por último se dibuja el punto hallado en la imagen y se cambia el valor de las variables que indican si ha sido correcto el cálculo y de que tipo. En estas dos figuras siguientes se puede ver el diagrama de bloques de las dos acciones que hallan el centro y que se ejecutan de forma secuencial dentro de una estructura.

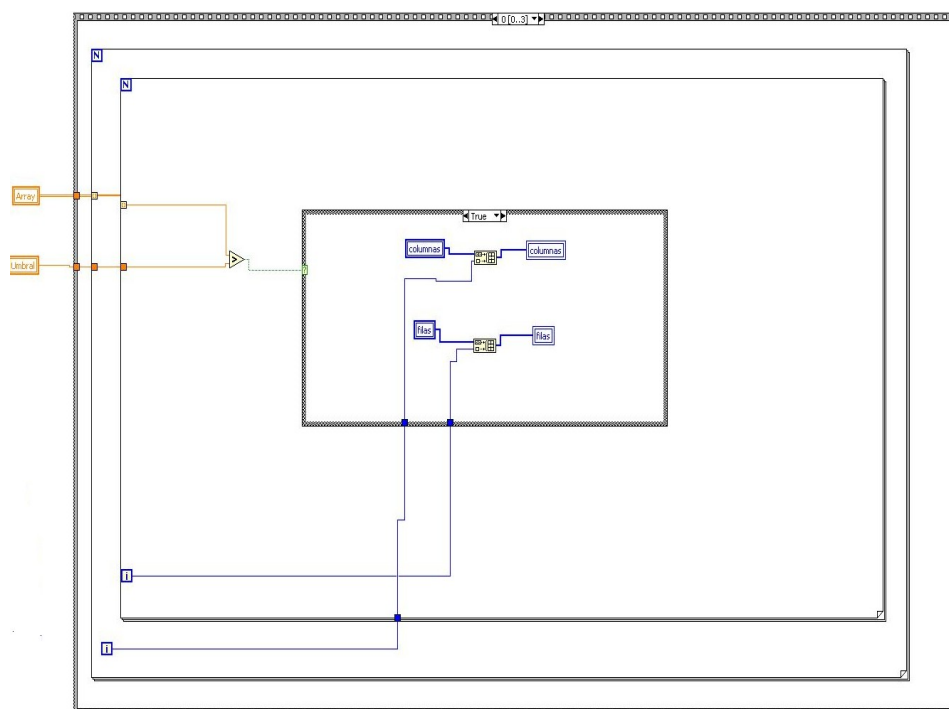


Figura A.12 – Recorre el array guardando las posiciones en las que el valor es mayor que el umbral

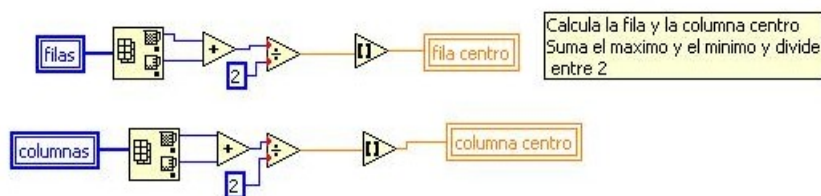


Figura A.13 – Halla la media de las posiciones mayores que el umbral, que será el centro

A.4 Obtener y corregir perspectiva

Como se ha visto en un capítulo anterior, en algunos montajes es imposible colocar la cámara perpendicular al receptor y es necesario inclinar la cámara un determinado ángulo. Las imágenes tomadas presentan una distorsión debido a la perspectiva y de lo que se encarga este bloque es de hallar los parámetros que definen esa perspectiva y corregir las imágenes. Una vez corregida se presenta por pantalla y se prepara para ser procesada como si hubiera sido tomada perpendicular al receptor.

Para la obtención de la perspectiva se utiliza la imagen de una malla de puntos situada en el lugar del receptor y captada por la cámara con el ángulo que hay que corregir. En una malla de este tipo es posible medir las distancias entre puntos y relacionarlas entre ellas. El diagrama de flujo de esta parte del programa se muestra a continuación, con las distintas acciones que hay que ejecutar.



Figura A.14 – Diagrama de flujo de la acción de obtener y corregir perspectiva de la imagen

La ejecución de todo el proceso de corrección de la perspectiva consta de tres eventos que se deben ejecutar secuencialmente. Estos eventos son **“Obtener Perspectiva”**, **“Cargar imagen a corregir”** y **“Corregir perspectiva”**, corresponden al evento de presionar los pulsadores en el menú y deben ejecutarse en el mismo orden. Antes de presionar el pulsador para obtener la perspectiva hay que introducir los parámetros relativos a la malla de puntos, estos son la distancia entre puntos en el eje x e y , y el rango de valores de estos puntos. El diagrama de bloques de “Obtener perspectiva” es el representado en el dibujo de abajo.

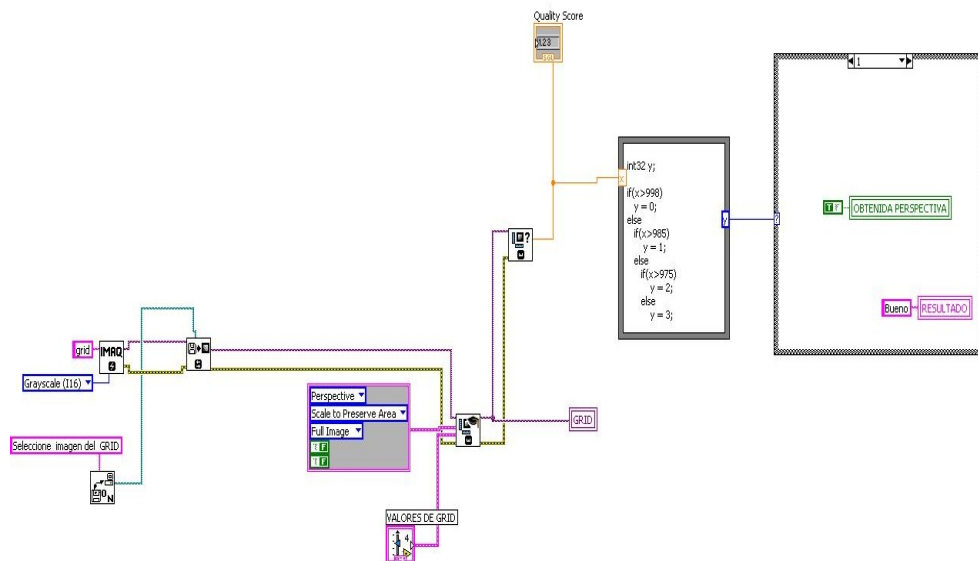


Figura A.15 – Obtener perspectiva de una imagen de malla de puntos y sus parámetros

Para obtener la perspectiva se necesita cargar la imagen de una malla de puntos. Una vez que se ha cargado la imagen, se utiliza el VI **“IMAQ Learn Calibration Template”** para caracterizar la perspectiva con la que se ha tomado. Para ello este VI compara las medidas en la imagen con la distancia real entre los puntos introducida como entrada. Se introducen el valor máximo y mínimo de los puntos en la imagen para que el VI pueda localizarlos. Una vez obtenida la perspectiva, el VI **“IMAQ Get Calibration Info”** nos indica la calidad del proceso, es decir si el algoritmo obtenido ha podido leer las características de forma correcta. Esta calidad viene expresada en un número entre 0-1000 y mediante un “case” establecemos un rango, si este rango no se supera la calibración no ha tenido efecto y debe volver a repetirse.

El siguiente paso es el de cargar una imagen para que sea corregida. Se muestra por pantalla y espera a que se corrija la imagen presionando el pulsador a tal efecto. Una vez que se pulsa, se procede a corregir la imagen ejecutando el evento cuyo diagrama de bloques se puede ver a continuación.

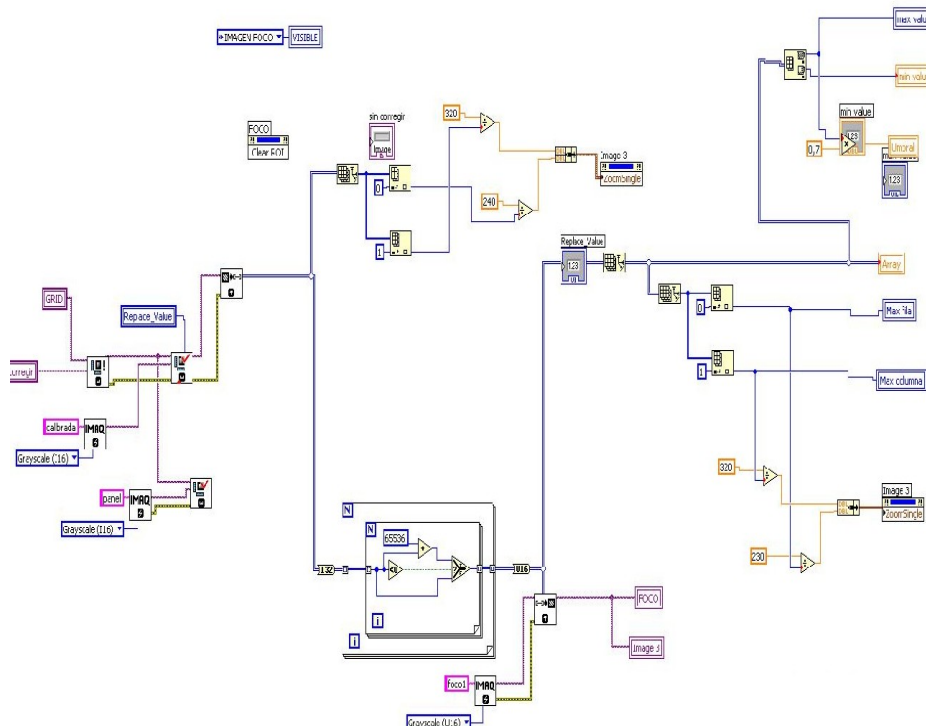


Figura A.16 – Aplica la corrección de perspectiva a la imagen del foco, la presenta por pantalla y halla sus valores.

En este evento la imagen se corrige, se presenta en el panel frontal como la imagen del foco a procesar y se extraen los valores a él asociados que sirven para realizar el procesamiento.

A.5 Procesar imagen foco

El procesamiento de la imagen es la parte del programa que, utilizando los valores obtenidos en otras partes de la aplicación, nos entrega como resultados los perfiles del foco de luz. También es posible obtener el perfil en 3D que es una representación del array. Para realizar el procesamiento hay varias opciones y algunas comprobaciones que realizar, como se puede ver en el diagrama de flujo que se muestra a continuación. Lo primero que se comprueba es si se dispone de todos los datos necesarios para poder realizar el procesamiento; estos son el centro de la imagen, el área útil y la constante de proporcionalidad K . En el caso de que no se disponga de alguno de estos datos el programa vuelve al menú que se encarga de obtenerlo.

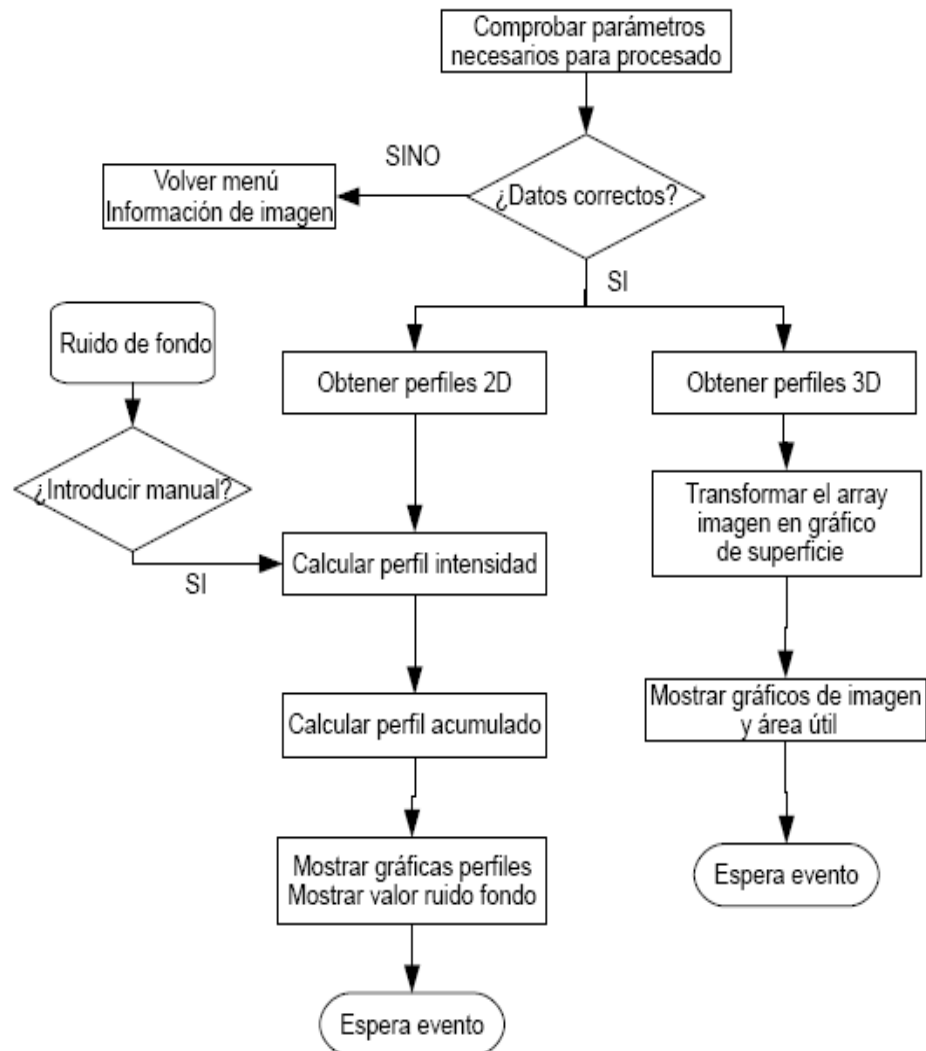


Figura A.17 – Diagrama de flujo del procesamiento de la imagen

Una vez realizada esta comprobación se puede realizar cualquiera de los dos procesados mediante los dos pulsadores que se presentan en el panel frontal, que son **“Obtener perfiles 2D”** y **“Obtener perfiles 3D”**. La ejecución de estos eventos se puede ver a continuación con detalle, siendo distinta dependiendo del tipo de concentrador al que pertenezca.

A.5.1 PERFILES 2D

Esta parte del programa se encarga de obtener el perfil de intensidad y el perfil acumulado, que ofrecen información sobre la distribución espacial de la intensidad en el receptor. La ecuación que representa cada uno de los perfiles y los cálculos necesarios para hallarlos se han explicado con anterioridad en el capítulo “*Desarrollo matemático*”, y en el diagrama de bloques siguiente se pueden ver como se realiza el cálculo de éste en varios pasos.

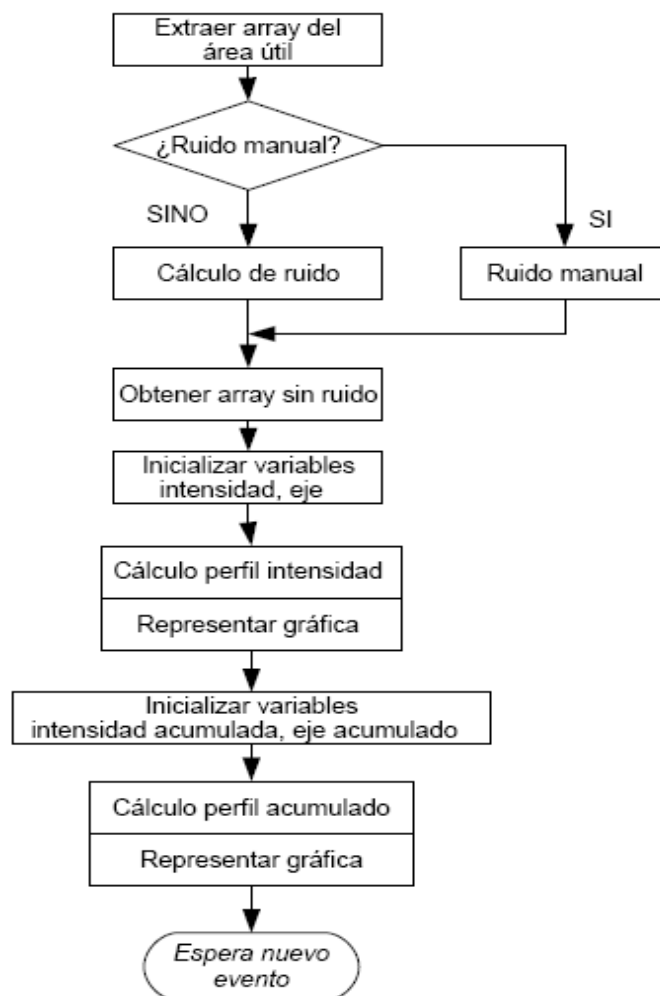


Figura A.18 – Diagrama de flujo para hallar los perfiles de intensidad y acumulado

Todas estas acciones son comunes para el caso de concentradores lineales o puntuales, pero el tratamiento que se da al array para ejecutarlas es diferente debido a la distinta geometría que presentan.

Lo primero es extraer de la imagen la parte del array que pertenece al área útil que hemos seleccionado con anterioridad. En el caso de un concentrador puntual este área es un rectángulo alrededor del foco, y en el caso de uno lineal son dos límites laterales. Tampoco el cálculo del ruido de fondo es igual en los dos casos; en el caso de un foco puntual es el mayor valor de la imagen fuera del área seleccionada, y para un foco lineal es el menor valor de la zona sombreada. Para diferenciar el tratamiento que le damos al array en uno y otro caso, en la programación de este evento como en otros se utiliza una estructura “case”.

Para hallar el ruido de fondo en una imagen de un foco puntual, se crea un array nuevo en el que todos los pixel de la zona seleccionada tengan valor 0. Para ello se recorre el array reemplazando las posiciones dentro del intervalo por el valor 0 con ayuda de un “case”. Para saber cuales son estas posiciones se comparan las coordenadas del área y los índices de los bucles mediante puertas lógicas. El ruido de fondo es el valor máximo de este array, en la figura siguiente se puede ver el diagrama de bloques.

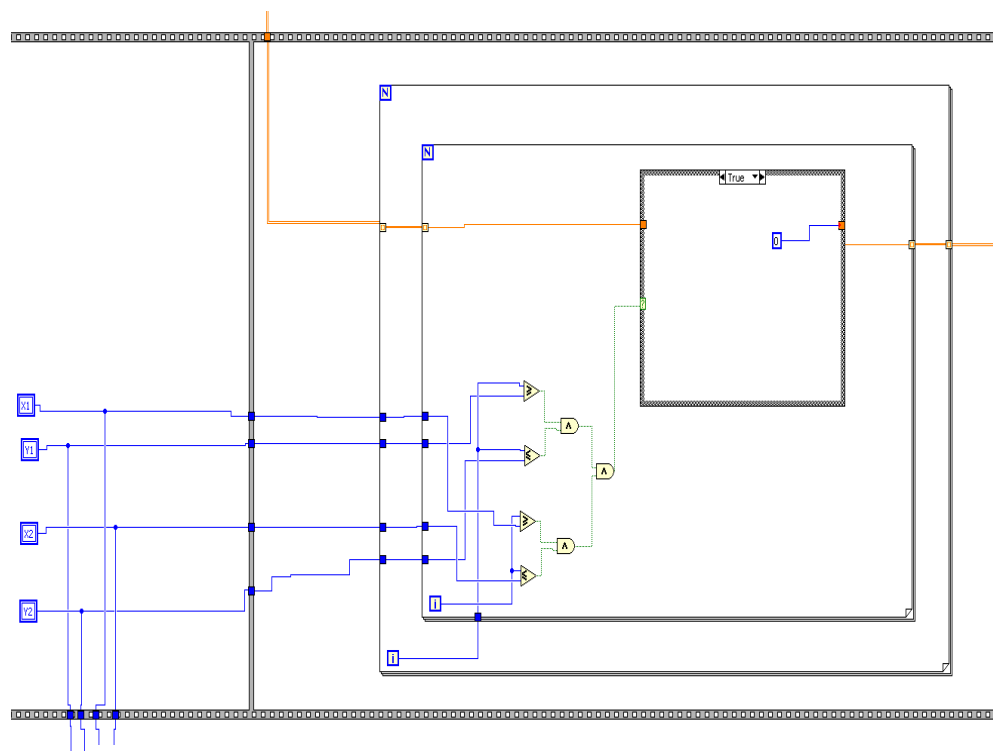


Figura A.19 – Resta el área útil al array para hallar el ruido de fondo

Lo siguiente es extraer del array original la sección que se quiere procesar y que ha sido seleccionada. Para ello se recorta el array total mediante el VI “*Array Subset*” al que se introduce el comienzo de la columna y fila y la longitud del array en cada una de las dimensiones. A este array se le resta el ruido de fondo hallado anteriormente. En este paso es cuando se decide si se realiza el procesado con el ruido de fondo calculado o con el introducido el usuario, dependiendo si se ha activado el pulsador para ello en el panel frontal. Para evitar que al restar el ruido el array tome valores negativos, se ponen a 0 los valores negativos. El diagrama de bloques de esta acción puede verse en la figura siguiente.

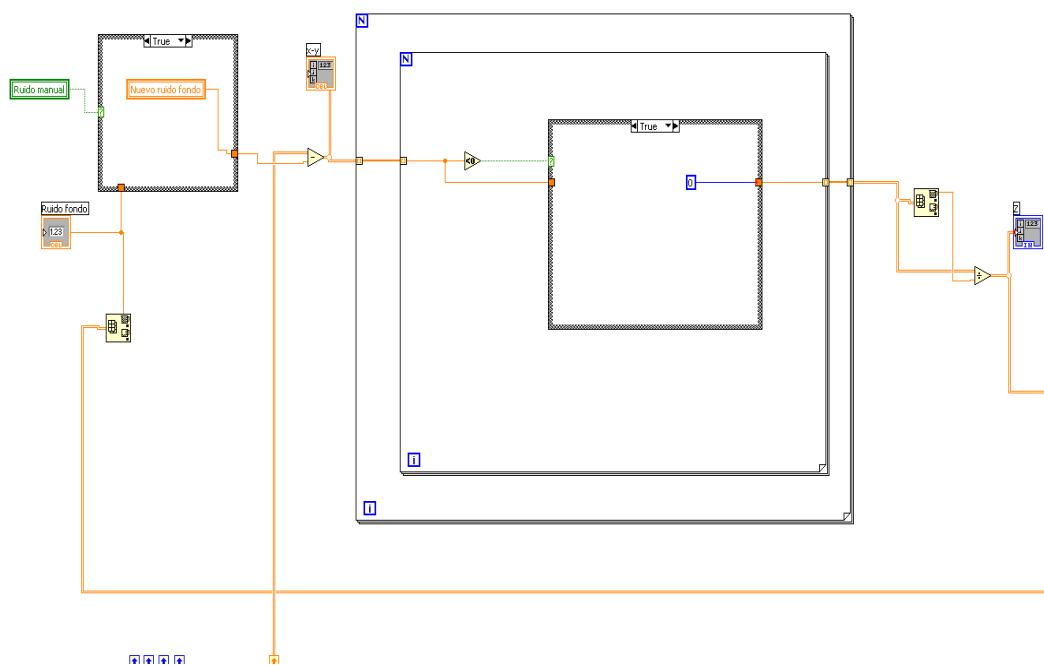


Figura A.20 – Resta el ruido de fondo controlando valores negativos

El array ya está preparado para obtener los perfiles, pero antes hay que convertir las coordenadas del centro ya que están relacionadas con el array completo. Por lo tanto hay que hallar las coordenadas referidas al nuevo array, que coincidan con el centro marcado anteriormente. Se desplazan las coordenadas usando las del área útil que se ha seleccionado con anterioridad. Así, restando al centro las coordenadas del vértice superior izquierdo del área se obtienen las coordenadas del centro con relación al área, y el vértice superior izquierdo pasa a ser el eje de coordenadas. Después se halla la mayor distancia del centro a cualquiera de los extremos del área para inicializar los array donde

se guardan los valores de intensidad y la distancia al centro para representar los perfiles de intensidad. La figura siguiente muestra la programación de este proceso.

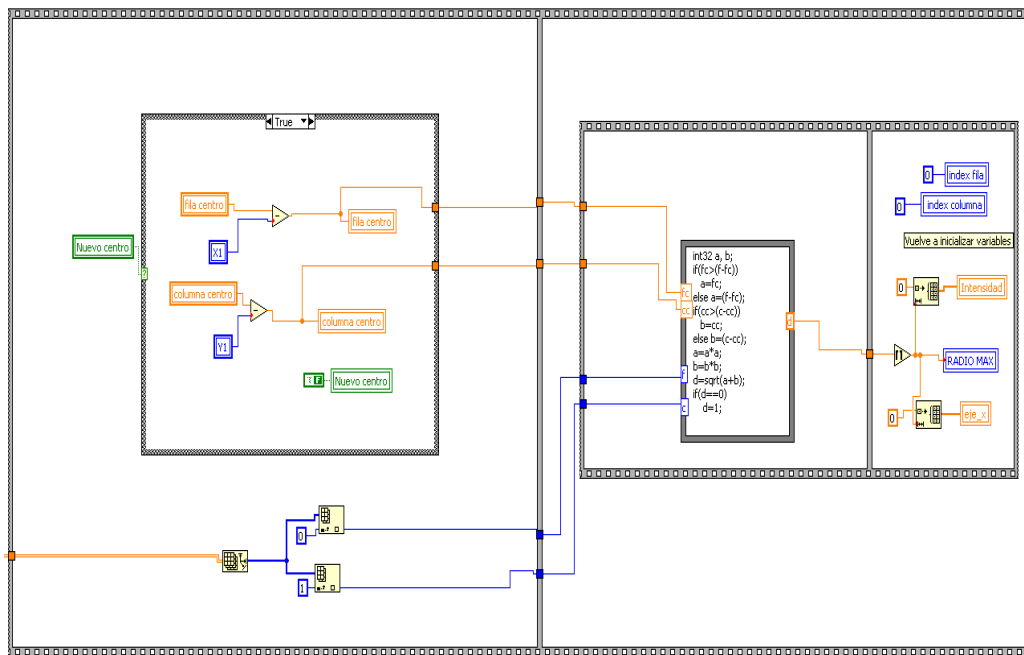


Figura A.21 – Reubicar el centro y hallar máxima distancia para inicializar variables

La siguiente acción que se realiza es construir el array “intensidad” y el array “eje” para mostrar el perfil de intensidad. En “intensidad” se guarda el valor de irradiancia para cada distancia al centro y en el array “eje” se guarda la distancia al centro en milímetros. Para ello se recorre cada posición del array, y con los índices de los bucles y con las coordenadas del centro hallamos la distancia en píxel al centro. Éste será utilizado como índice para guardar el valor correspondiente en “intensidad” y “eje”. En el array “eje” el valor que se escribe es la distancia en píxel dividida por la constante “K”, que es igual a la distancia en milímetros. En “intensidad”, como en la imagen existen varios píxel que se encuentran a la misma distancia, se suma el valor de ese píxel con el acumulado en el array “intensidad” y se guarda en la misma posición. En la figura de a continuación se puede ver el diagrama de bloques que realiza esta acción.

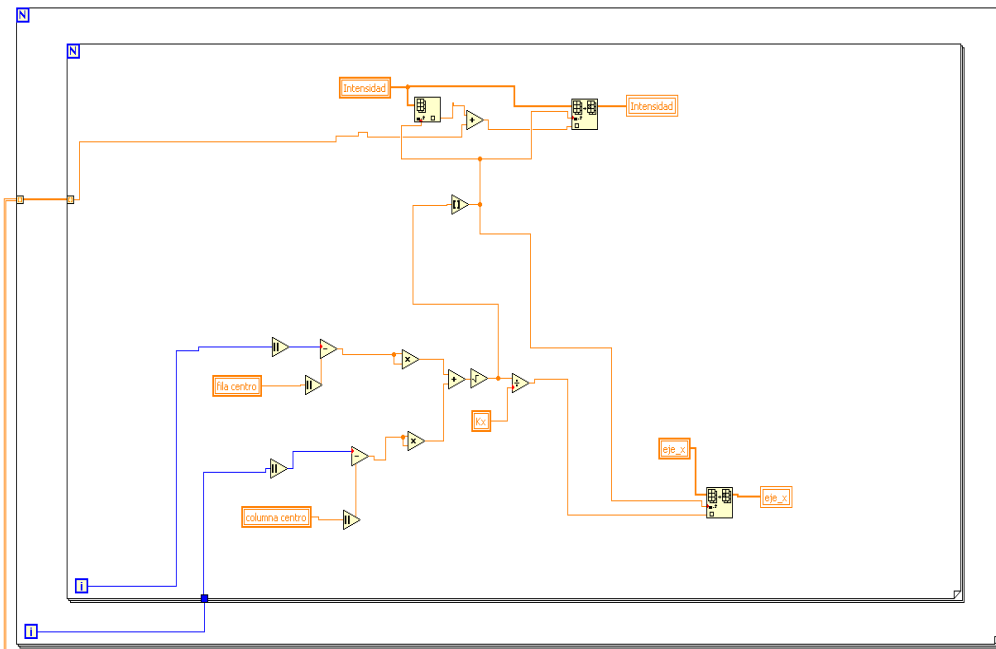


Figura A.22 – Halla la intensidad a cada distancia del centro

Cuando se recorre toda la imagen y se han construido los array “*intensidad*” y “*eje*”, se normaliza la intensidad y se unen los array. Esta estructura de datos se introduce en un VI llamado “**XY Graph**”, que representa una función en el que las coordenadas de cada punto son cada par de valores de los array en esa posición. El array “*eje*” contiene las coordenadas del eje *x*, y las coordenadas del eje *y* se encuentran en el array “*intensidad*”.

Para calcular el perfil acumulado se utiliza un nuevo array llamado “*intensidad acumulada*”. Para representar las distancias sirve el array “*eje*” que hemos construido anteriormente, ya que el radio es el mismo. En “*intensidad acumulada*” cada posición es la suma de los valores del array “*intensidad*” anteriores, es decir, es la suma de los valores de intensidad de radios menores. Para construirlo se utiliza un bucle “*while*” que no termina su ejecución hasta que el índice no llega al radio máximo. Cuando se llega al final se normaliza y se representa el perfil acumulado como en el caso anterior. En la imagen siguiente se muestra el diagrama de bloques dentro del bucle.

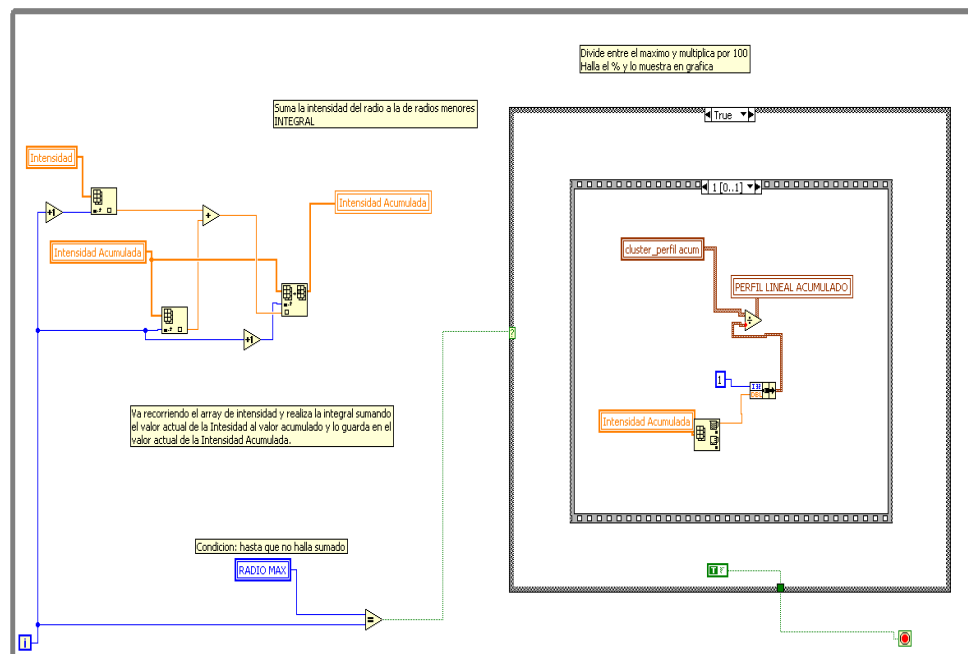


Figura A.23 – Recorre el array intensidad y halla la intensidad acumulada.

En el caso de que el concentrador sea lineal el proceso varía en algunos pasos. Para preparar el array de la imagen solo se debe recortar a la izquierda y derecha de los límites laterales que ha marcado el usuario. El ruido de fondo aquí será el mayor valor de la zona fuera del foco e igual que antes se decide si utilizar el ruido de fondo manual o el calculado. Se inicializan los array necesarios, que son los mismos que en el caso anterior, con la longitud máxima en píxel que hay en la imagen.

Se construyen los array “intensidad” y “eje” de una forma más fácil que en el caso de caso de foco puntual. Se recorre el array sumando los valores de una misma fila, cuando se llega al final se guarda ese valor y la distancia al centro. La representación del perfil de intensidad es diferente al caso anterior ya que se hace en función de la semi-anchura. Por lo tanto el índice para ellos es el del bucle que barre cada fila, la distancia sería la diferencia entre el índice y la línea del centro dividido entre la constante de proporcionalidad. El valor que se guarda en “intensidad” sería el acumulado de la fila como se puede ver en la figura siguiente. Cuando se han recorrido todas las filas se forma una estructura como en el caso anterior para ser mostrada.

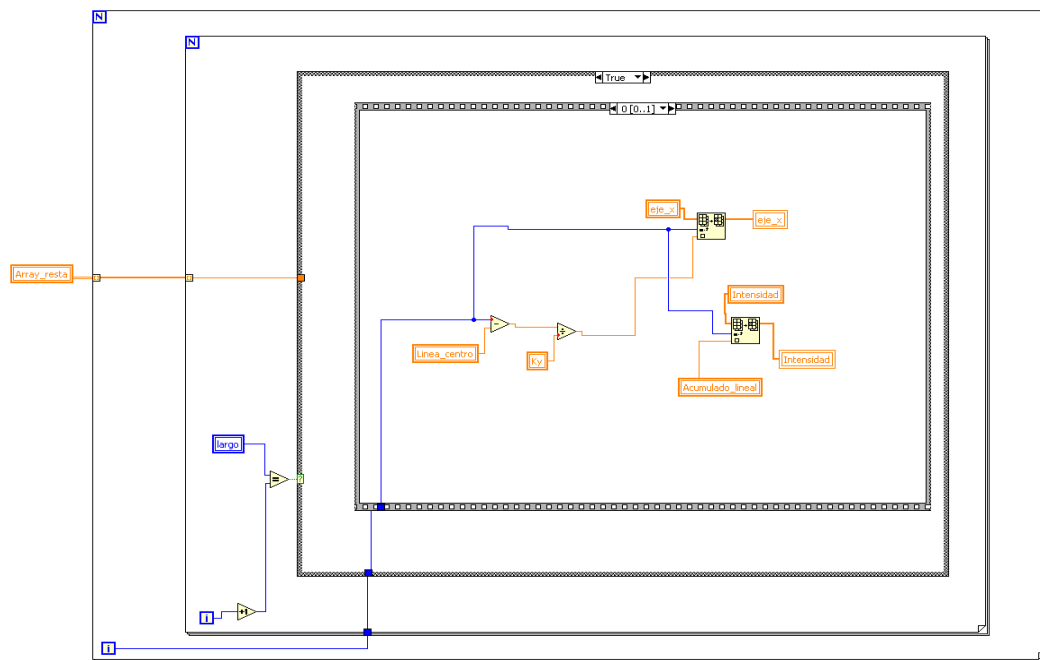


Figura A.24 – Suma y guarda la intensidad en cada fila de la imagen y halla la distancia al centro

El perfil acumulado también se halla de forma diferente por estar representado el perfil de intensidad en función de la semi-anchura. En este caso se construye otro eje utilizando el array “*eje acumulado*”. También se usan dos índices para recorrer el array “*intensidad*” con origen en la línea centro, uno crece y otro decrece para localizar posiciones a la misma distancia del centro. Con estos índices se extraen los valores de intensidad a la misma distancia y se suman al valor acumulado en el array “*intensidad acumulada*”. El array “*eje acumulado*” se construye hallando la distancia en píxel a la línea del centro utilizando uno de los índices con los que se recorre el array “*intensidad*”. Se divide entre la constante de proporcionalidad y se multiplica por dos, ya que se desplaza a un lado y otro de la imagen y la distancia comprendida es el doble. La programación de esta acción puede verse en la imagen de a continuación..

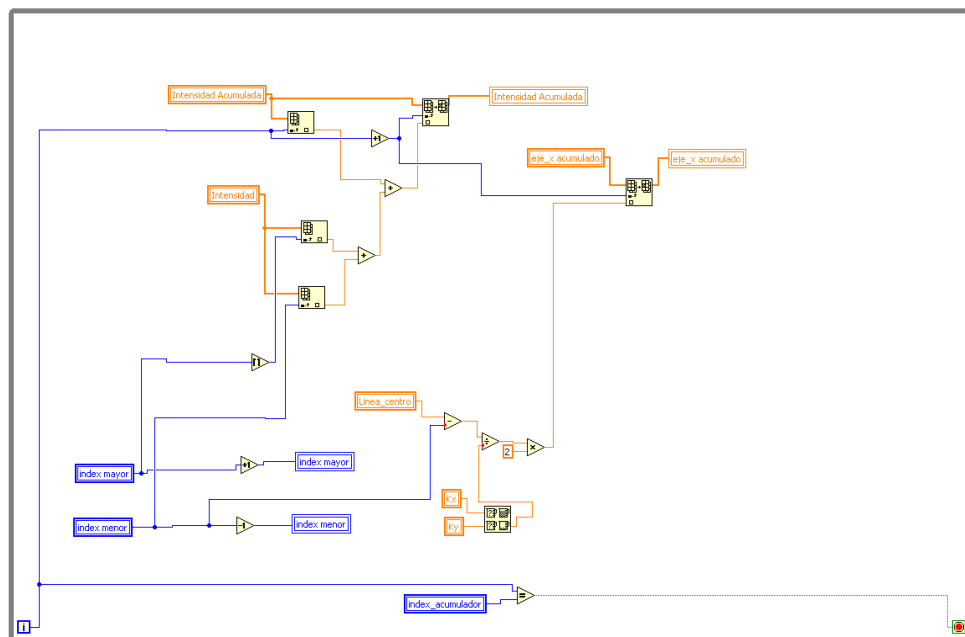


Figura A.25 – Halla la intensidad acumulada recorriendo el array intensidad

Una vez que se ha recorrido toda la imagen desde el centro en una y otra dirección, el bucle termina, se normaliza el array “*intensidad acumulada*” y se crea una estructura para mostrar los resultados en un gráfico como en los casos anteriores.

A.5.2 PERFILES 3D

El perfil en 3D de la imagen del foco es una representación llamada mapa de superficie. La imagen se sitúa en el plano X-Y y los valores que toma cada píxel se representan interpolados entre si en el eje Z. Esta representación es muy ilustrativa pero poco manejable, debido a ello es por lo que se obtienen los perfiles de intensidad y acumulado.

Se muestran dos mapas de superficie en este apartado, uno perteneciente a la imagen entera y otro perteneciente a la parte que hemos seleccionado como área útil. Se representan los mapas de superficie utilizando un VI llamado “*3D Surface*”, al cual se introduce el array de la imagen completa y del área seleccionada, como se puede ver en la imagen siguiente.

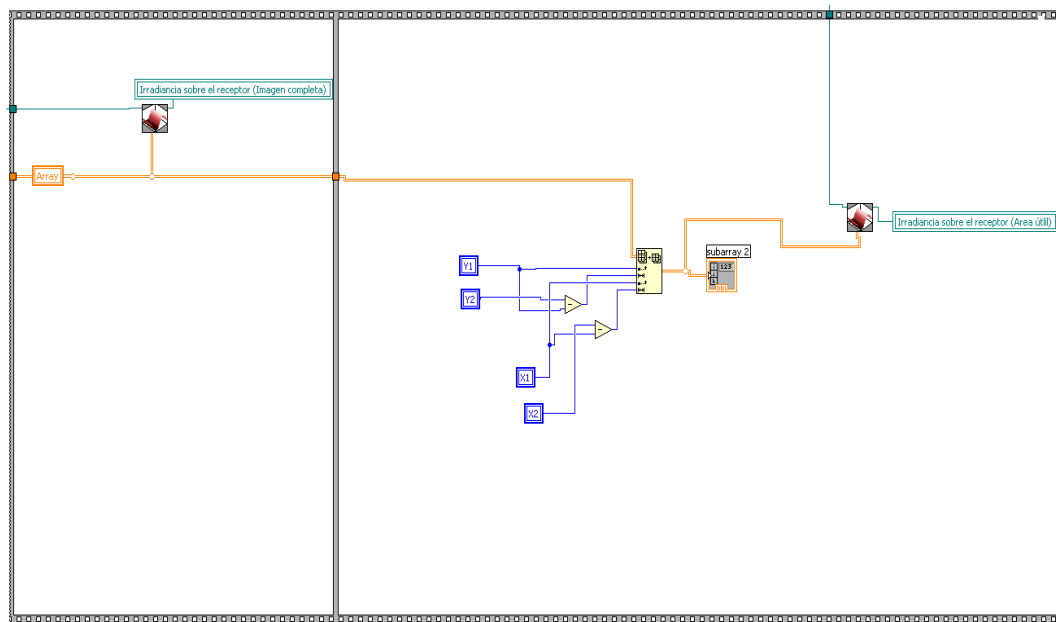


Figura A.26 – Muestra el mapa de superficie de la imagen

A.6 Guardar datos de la imagen

La finalidad de este apartado es guardar los datos que se han obtenido del procesamiento de la imagen para almacenarlos o tratarlos con otra aplicación. Los datos que se pueden guardar son los perfiles de intensidad y el array de la imagen, y el tipo de archivo utilizado puede ser excel o un documento de texto. En la imagen siguiente se muestra el diagrama de flujo de este menú.

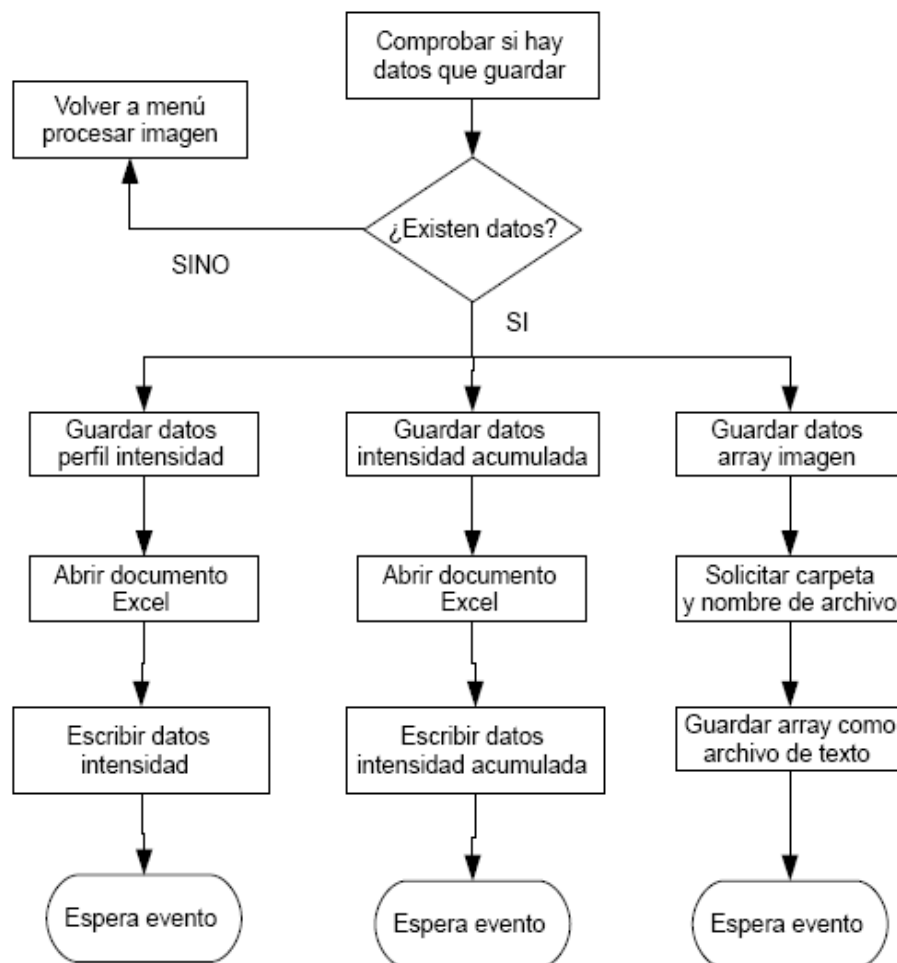


Figura A.27 – Diagrama de flujo de la acción de guardar datos en fichero

Existen tres eventos en la estructura principal que coinciden con las tres opciones que se pueden realizar. Estos eventos están relacionados con los pulsadores presentes en el panel frontal “*Guardar intensidad*”, “*Guardar intensidad acumulada*” y “*Guardar imagen*”. Los perfiles de intensidad se guardan en un archivo excel y el array de la imagen en un documento de texto, ya que en excel no se pueden escribir mas de 256 columnas y la resolución de las imágenes es mayor.

Los perfiles se guardan utilizando un módulo para generar reportes en excel y word (Report Generation Toolkit). Los datos del eje y de la intensidad se escriben en una columna cada uno, y al lado se muestra la gráfica del perfil correspondiente. El evento que lo realiza se muestra en la siguiente figura, se abre un documento excel, se escriben las columnas de datos y se muestra la gráfica. Para mostrar la gráfica se introducen varios parámetros para determinar el color, las leyendas de los ejes, la localización, etc.

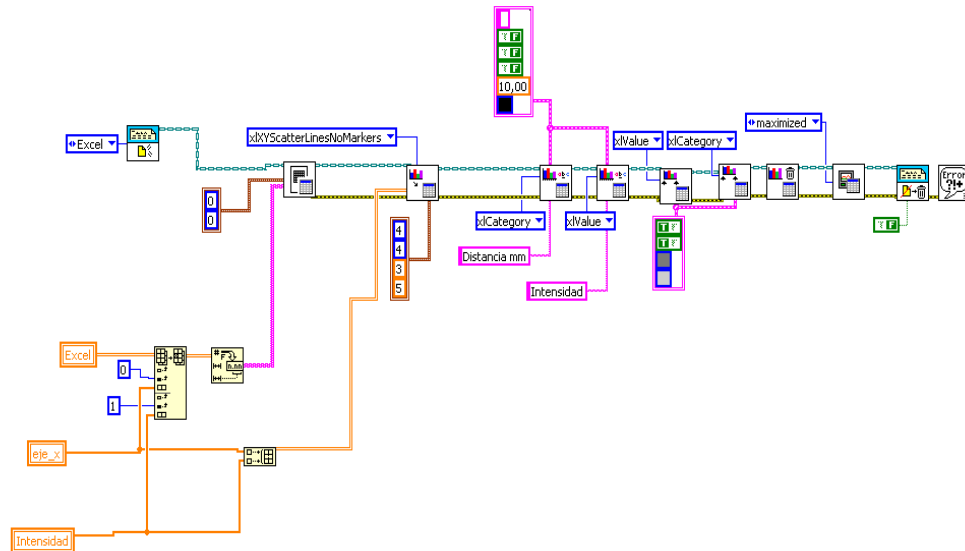


Figura A.28 – Abre un fichero excel, guarda los datos y muestra una gráfica

El array de la imagen se guarda en un archivo de texto sin mostrarse por pantalla. Para ello se crea un archivo con la extensión *.txt*, se convierte el array a una cadena de caracteres y se escribe en el archivo. Después se cierra la referencia al archivo, este diagrama de bloques es el siguiente.

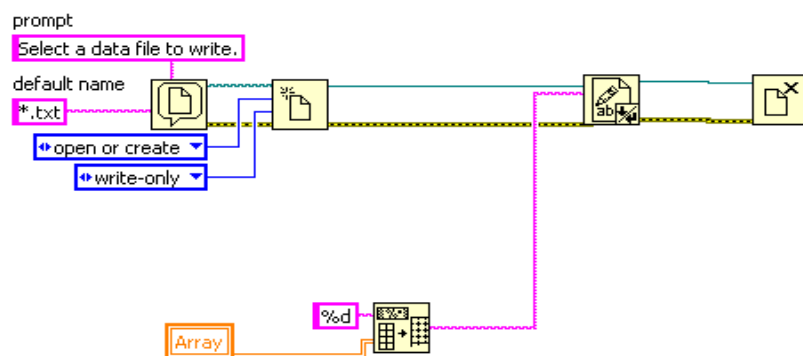


Figura A.29 – Guarda el array de la imagen en un fichero de texto

A.7 Salir de la aplicación

Esta parte de la aplicación se ocupa de terminar con la ejecución de la misma. Para ello una vez que se pincha sobre el submenú “Salir” se nos presenta por pantalla un pulsador para tal efecto, al presionarlo se genera un evento que lo único que hace es finalizar el bucle “while” en el que está contenida toda la programación y así finalizar la ejecución de la aplicación. El diagrama de bloques de esta acción puede verse a continuación.



Figura A.30 – Diagrama de flujo de la acción de salir de la aplicación